

Martin Walter

***Untersuchungen zur Modellierung und zur Automatisierung
von Sprenglochbohrwagen unter Berücksichtigung der
Parallelführung der Bohrlafette***

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2018300042

Retrodigitalisierung der gleichnamigen Ausgabe:

<i>Erschienen:</i>	Dissertation, Technische Hochschule Ilmenau, 1988
<i>Umfang:</i>	1 Band (verschiedene Seitenzählungen) : Diagramme Enthält außerdem: Thesen
<i>Digitalisierung durch:</i>	Universitätsbibliothek Ilmenau / ilmedia
<i>Digitalisierungsjahr:</i>	2018
<i>Format:</i>	TIFF, 300 DPI, 8 BPP

Untersuchungen zur Modellierung und zur Automatisierung
von Sprenglochbohrwagen unter Berücksichtigung der
Parallelführung der Bohrlafette

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor - Ingenieur (Dr. - Ing.)

eingereicht bei der Fakultät für Technische Wissenschaften
des Wissenschaftlichen Rates
der Technischen Hochschule I l m e n a u

vorgelegt von : Dipl.- Ing. Martin Walter
geboren am : 12. 12. 1956 in Bad Salzungen

eingereicht am : 11. 04. 1988
verteidigt am : 05. 10. 1988
Verfahrens- Nr. : T 2030

Autorreferat

Dipl.- Ing. Martin Walter

Untersuchungen zur Modellierung und zur Automatisierung von
Sprenglochbohrwagen unter Berücksichtigung der
Parallelführung der Bohrlafette
1988. - 100 S., 21 Abb., 14 Tab., 60 Lit., 7 Anl.

Ilmenau, Technische Hochschule, Sektion Informationstechnik
und Theoretische Elektrotechnik,
Dissertation

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung des Positionierungsverhaltens der Bohrlafette von Sprenglochbohrwagen zur Antriebssteuerung sowie der Untersuchung von Möglichkeiten der Automatisierung des Bohrprozesses. Dabei ist die Parallelführung der Lafette im technologischen Prozeß eine aus sprengtechnischer Sicht zu erfüllende Forderung.

Ziel der Untersuchungen ist es, Vorschläge für die Weiterentwicklung der Bohrtechnik zu erarbeiten.

Auf Grund der vielfältigen Einflußgrößen auf die Positionierung sowie der Komplexität des Themas wurde als Untersuchungsmethode die Rechnersimulation gewählt. Deshalb stellen die Untersuchungen zur Modellierung einen Hauptteil der Arbeit dar. Sie sollen zeigen, inwieweit die Methode der Simulation auf die vorhandenen Bohrwagen anwendbar ist und welche Genauigkeit die Ergebnisse besitzen.

Ausgehend vom technischen Stand der Entwicklung von Bohrwagen werden die erarbeiteten Modelle vorgestellt und bewertet. Kriterium der Bewertung ist ein Vergleich mit Ergebnissen der durchgeführten Messungen.

An modifizierten Bohrwagen der laufenden Produktion wurden dazu Messungen zum statischen und dynamischen Verhalten des

Bohrwagens durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienten vor allem der Modellverbesserung und sind in Form von Tabellen, Diagrammen und verbalen Beschreibungen in der Arbeit dargestellt.

Ebenso werden die vorhandenen Konstruktionen von Bohrwagen bewertet und Vorschläge zu ihrer Verbesserung gemacht.

Die zur Durchführung der Messung erstellten Hard- und Softwarebausteine werden anhand von Blockschaltbildern und Struktogrammen erläutert.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Formulierung der Parallelitätsbedingung der Lafettenführung als wichtiges Element zur Ermittlung von Ansteuerfunktionen der Antriebe. Es kann nachgewiesen werden, daß die Parallelitätsbedingung nicht durch einfachen Winkelvergleich korrespondierender Antriebe erfüllt werden kann, sondern daß die durch einen Antrieb einzustellende Gelenkkoordinate von allen anderen Gelenkstellungen abhängt und für verschiedene Lafettenpositionen unterschiedlich ist.

Ausgehend von den Ergebnissen der Modellierung und Messung werden mögliche Ansteuervarianten für die Antriebe vorgestellt und deren Realisierung beschrieben.

Aus dem Vergleich von Modellierung und Messung sowie aus bergbautechnischen Erkenntnissen wird eine Realisierungsvariante und die notwendigen Entwicklungsstufen dargestellt.

Die Ergebnisse sind grundsätzlich auf andere Gelenkanordnungen, etwa an Baggern, Robotern u. ä., übertragbar.

Zukünftig sind weiterführende Untersuchungen zu noch nicht erfaßten Einflußgrößen auf die Positionierung, zur Gestaltung von Regelkreisen bei der Antriebsansteuerung sowie zu Lageveränderungen der Lafette beim Andrücken an die Ortsbrust durchzuführen.

Inhaltsverzeichnis

=====

Seite

0.	Einleitung	1
1.	Internationaler Stand und Zielstellung der Arbeit	3
1.1.	Antriebssteuerungen bei Bohrwagen zur Bohrspindelpositionierung unter dem Gesichtspunkt der Lafettenparalleelführung	3
1.2.	Erläuterung der Aufgabenstellung und Abgrenzung	9
2.	Modellierung	13
2.1.	Zielstellung der Modellbildung	13
2.2.	Einführung von Koordinatensystemen zur Beschreibung des kinematischen Modells	14
2.2.1.	Die Denavit- Hartenberg- Notation	14
2.2.2.	Berücksichtigung des Einflusses der Biegung	18
2.2.3.	Die Koordinatensysteme des Bohrwagens SB 2/1	22
2.2.4.	Die Koordinatensysteme des Bohrwagens SB 2/2	23
2.2.5.	Parallelitätsbedingung	25
2.3.	Beschreibung der geschaffenen Modelle	28
2.3.1.	Nutzung des Simulationssystems "DIMAN" zur Bohrwagensimulation	28
2.3.2.	Modell zur Koordinatentransformation	29
2.3.3.	Modell zur Momentberechnung bezüglich der Drehachsen	32
2.3.4.	Modell zur Kraftberechnung für Arbeitszylinder	36
2.3.5.	Modell für Proportionalwegeventile	37
2.3.6.	Modell für die gesteuerte Paralleelführung	38
2.3.7.	Modell für die geregelte Paralleelführung	43
2.4.	Bewertung der geschaffenen Modelle	47

3.	Beschreibung der durchgeführten Messungen	50
3.1.	Messungen am Bohrwagen SB 2/1	50
3.1.1.	Zielstellung der Messungen	50
3.1.2.	Meßaufbau und Meßablauf	50
3.1.3.	Auswertung und Ergebnisse	55
3.2.	Messungen am Bohrwagen SB 2/2	59
3.2.1.	Zielstellung der Messungen	59
3.2.2.	Meßaufbau und Meßablauf	60
3.2.3.	Auswertung und Ergebnisse	67
4.	Varianten von Antriebsansteuerungen und Realisierung am SB 2/2	76
4.1.	Direkte Handsteuerung der Proportionalwegeventile	76
4.2.	Automatische Lafettenpositionierung mit vorausberechneter Parallelführung	78
4.3.	Handsteuerung mit geregelter Lafettenparallelführung	80
4.4.	Automatische Positionierung mit geregelter Lafettenparallelführung	81
5.	Einordnung der Untersuchungsergebnisse in die Weiterentwicklung der Bohrwagen SB 2/1 und SB 2/2	83
6.	Zusammenfassung	92
7.	Literaturverzeichnis	94
8.	Anlagen	

Anlagenverzeichnis

=====

Anlage 1 Koordinatensysteme und Transformationsmatrizen
des Bohrwagens SB 2/1

Anlage 1 - 1 Koordinatensysteme 0 und 1

Anlage 1 - 2 Koordinatensysteme 1 und 2

Anlage 1 - 3 Koordinatensysteme 2 und 3

Anlage 1 - 4 Koordinatensysteme 3 und 4

Anlage 1 - 5 Koordinatensysteme 4 und 5

Anlage 1 - 6 Koordinatensysteme 5 und 6

Anlage 1 - 7 Koordinatensysteme 6 und 7

Anlage 2 Koordinatensysteme und Transformationsmatrizen
des Bohrwagens SB 2/2

Anlage 2 - 1 Koordinatensysteme 0 und 1

Anlage 2 - 2 Koordinatensysteme 1 und 2

Anlage 2 - 3 Koordinatensysteme 2 und 3

Anlage 2 - 4 Koordinatensysteme 3 und 4

Anlage 2 - 5 Koordinatensysteme 4 und 5

Anlage 2 - 6 Koordinatensysteme 5 und 6

Anlage 2 - 7 Koordinatensysteme 6 und 7

Anlage 3 Meßkurven dynamischer Messungen an SB 2/1 und
SB 2/2

Anlage 3 - 1 Vertikaler Anfahrvorgang des Antriebes 2,1 ,
gedämpft

Anlage 3 - 2 Vertikaler Anfahrvorgang des Antriebes 2,1 für
den SB 2/1, ungedämpft

Anlage 3 - 3 Horizontaler Anfahrvorgang des Antriebes 1,0 für
den SB 2/1, gedämpft

Anlage 3 - 4 Horizontaler Anfahrvorgang des Antriebes 1,0 für
den SB 2/1, ungedämpft

Anlage 3 - 5 Horizontaler Ausschwingvorgang des
Antriebes 1,0 für den SB 2/1, ungedämpft

- Anlage 3 - 6 Sollwertsprung am Antrieb 2,1 für den SB 2/2
- Anlage 3 - 7 Sollwertsprung am Antrieb 5,4 für den SB 2/2
- Anlage 3 - 8 Sollwertsprünge an den Antrieben 2,1 und 5,4 für den SB 2/2
- Anlage 3 - 9 Sollwertsprung am Antrieb 2,1 für den SB 2/2
- Anlage 4 Meßkurven zur gesteuerten Parallelführung mit verbesserter Kennlinienapproximation
- Anlage 4 - 1 Ansteuerfunktion "Rechteck" bei ausgefahrener Lafette
- Anlage 4 - 2 Ansteuerfunktion "Dreieck" bei ausgefahrener Lafette
- Anlage 4 - 3 Ansteuerfunktion "Sinus" bei ausgefahrener Lafette
- Anlage 4 - 4 Ansteuerfunktion "Sinoide" bei ausgefahrener Lafette
- Anlage 4 - 5 Ansteuerfunktion "Roboter" bei ausgefahrener Lafette
- Anlage 4 - 6 Ansteuerfunktion "Rechteck" bei eingefahrener Lafette
- Anlage 4 - 7 Ansteuerfunktion "Dreieck" bei eingefahrener Lafette
- Anlage 4 - 8 Ansteuerfunktion "Sinus" bei eingefahrener Lafette
- Anlage 4 - 9 Ansteuerfunktion "Sinoide" bei eingefahrener Lafette
- Anlage 4 -10 Ansteuerfunktion "Roboter" bei eingefahrener Lafette
- Anlage 4 -11 Ansteuerfunktion "Roboter" mit konstantem Geschwindigkeitsanteil; Beschleunigungszeit 2 s
- Anlage 4 -12 Ansteuerfunktion "Roboter" mit konstantem Geschwindigkeitsanteil; Beschleunigungszeit 1 s
- Anlage 4 -13 Ansteuerfunktion "Roboter" mit konstantem Geschwindigkeitsanteil; Beschleunigungszeit 0.4 s

- Anlage 5 Struktogramme erstellter Mikrorechnerprogramme
- Anlage 5 - 1 Struktogramm zu "STELLUNG"
- Anlage 5 - 2 Struktogramm zu "MESSUNG"
- Anlage 5 - 3 Struktogramm zu "PROPSTAT"
- Anlage 5 - 4 Struktogramm zu "PROPVENT"

- Anlage 6 Verzeichnis aller erstellten
 Mikrorechnerprogramme

- Anlage 7 Blockschaltbilder und Prinzipdarstellungen
- Anlage 7 - 1 Kinematische Struktur des SB 2/1
- Anlage 7 - 2 Kinematische Struktur des SB 2/2
- Anlage 7 - 3 Meßaufbau für die statischen Messungen am SB 2/1
- Anlage 7 - 4 Blockschaltbild der CTC- Karte
- Anlage 7 - 5 Meßaufbau für die statischen Messungen am SB 2/2
- Anlage 7 - 6 Blockschaltbild der DAU- Karte
- Anlage 7 - 7 Meßaufbau für die dynamischen Messungen
 am SB 2/2
- Anlage 7 - 8 Blockschaltbild der ADU- Karte
- Anlage 7 - 9 Realisierungsvariante der direkten Handsteuerung
 der Proportionalwegeventile am SB 2/2

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

=====

Symbol	Bedeutung	Einheit

A	Punkt	
Ad _A	Adjunkte einer Matrix A _{i,j}	
A _{i,j}	4*4- Transformationsmatrix zwischen den Koordinatensystemen i und j	
A _K	Kolbenfläche eines Hydraulikantriebes	m ²
a(t)	Sollbeschleunigungs- Zeit- Funktion eines Hydraulikantriebes	ms ⁻²
a _{i,j}	Komponenten einer Matrix A	
B	Punkt	
d _{i,i-1}	Parameter der Denavit- Hartenberg- Notation	m
E	Elastizitätsmodul	Nmm ⁻²
e _i	Regelabweichung des Systems i (w _i - v _i)	
F _{0,i}	Schwerkraftvektor der Masse i, angegeben im Bezugskoordinatensystem 0	N
F _{i,i-1}	Schwerkraftkomponenten von F _{0,i} im Koordinatensystem i-1	N
F _{Ki}	Kraft auf den Hydraulikzylinder i,i-1 , positiv mit M _{Zi}	N
F _{Mi-1}	Projektion von F _{i,i-1} in der x _{i-1} - y _{i-1} - Ebene; momenterzeugende Kraft um z _{i-1}	N
g	Erdbeschleunigung	ms ⁻²
g _i	Reglerkoeffizient	
h _{i,i-1}	Durchbiegung	mm
J	Trägheitsmoment	mm ⁴
J(q _n)	Jacobi- Matrix der Gelenkkoordinaten	
K	Proportionalitätsfaktor	
L _{Zi,i-1}	Ausfahrlänge des Hydraulikzylinders i,i-1 (Abstand der Anlenkpunkte)	m

$\Delta L_{Zi,i-1}$	Ausfahrlängendifferenz des Hydraulikzylinders $i,i-1$ zwischen Start- und Zielpunkt der Bewegung	m
M_{zi}	Drehmoment um die Achse z_i ; positiv mit z_i	Nm
$P_{i,j}$	Punkt des Koordinatensystems i , angegeben im Koordinatensystem j	m
p	Druck	MPa
$Q_{i,i-1}$	Ölstrom des Antriebes $i,i-1$	$l \cdot \text{min}^{-1}$
q_n	Gelenkkoordinaten ($\varphi_{i,i-1}; s_{i,i-1}$)	grad, rad; m
R_{Ki}	wirksamer Hebel des Hydraulikzylinders i	m
R_{Mi-1}	wirksamer Hebel der Kraft F_{Mi-1}	m
r_i	Hebel i	m
$S_{i,n}$	Schwerpunkt des Systems i , angegeben in Koordinaten des Systems n	m
$S_{j,n}$	Schwerpunkt des Systems j , angegeben in Koordinaten des Systems n	m
$S_{ersn,n}$	Ersatzschwerpunkt zweier Einzelschwerpunkte des Koordinatensystems n im Koordinatensystem n	m
$S_{ersn,n-1}$	Ersatzschwerpunkt zweier Einzelschwerpunkte des Koordinatensystems n im Koordinatensystem $n-1$	m
s_y	Ventilaussteuerung	mm
$s_{i,i-1}$	Parameter der Denavit- Hartenberg-Notation	m
T_0	Abtastintervall	
T_D	Differentiationszeitkonstante	
T_i	Integrationszeitkonstante	
$U_{i,i-1}$	Steuerspannung des Antriebs $i,i-1$	V
u_i	Stellgröße des Systems i	
v_i	Istwert des Systems i	
$v_{i,j}$	Geschwindigkeit des Antriebs i,j	m/s
WH	Winkelsumme horizontal	grad, rad
WV	Winkelsumme vertikal	grad, rad
w_i	Sollwert des Systems i	

x_i, y_i, z_i	Achsen eines kartesischen Koordinatensystems i	m
α	Tangentenwinkel	grad, rad
β	Durchbiegungswinkel	grad, rad
γ	Tangentenwinkel	grad, rad
ϑ	Durchbiegungswinkel	grad, rad
ε_i	Anlenkwinkel des Hydraulikzylinders i	grad, rad
θ	Eulerwinkel	grad, rad
$\vartheta_{i,i-1}$	Parameter der Denavit- Hartenberg-Notation	grad, rad
φ_{Fi-1}	Winkel der momenterzeugenden Kraft zur x_{i-1} - Achse	grad, rad
φ_{Ri-1}	Winkel des momenterzeugenden Hebels zur x_{i-1} - Achse	grad, rad
ϕ	Eulerwinkel	grad, rad
$\vartheta_{i,i-1}$	Parameter der Denavit- Hartenberg-Notation	grad, rad
ϑ_{Sl}	Winkel des Schwenklagerzapfens zur Senkrechten	grad, rad
ϑ_{Tr}	Winkel der Tragkonstruktion zur Senkrechten	grad, rad
ψ	Eulerwinkel	grad, rad

Indizes

i, j, n	Nummerierungsindizes
b	Bohrwagen
e	Ebene
K	Kolben
l	Lafette
Sl	Schwenklagerzapfen
Tr	Tragkonstruktion
Z	Zylinder
$x; y; z$	x-, y-, z- Achse
\max, \min	Maximal- bzw. Minimalwert einer Größe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während der Zeit meiner befristeten Assistenz und der anschließenden Delegation an der Sektion INTET der Technischen Hochschule Ilmenau.

Den Mitarbeitern des Wissenschaftsbereiches Allgemeine Elektrotechnik und Technische Erkennung, die bei der Anfertigung dieser Arbeit wertvolle Unterstützung gaben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Insbesondere danke ich meinem wissenschaftlichen Betreuer, Herrn Doz. Dr. sc. techn. P. Latussek, für die fruchtbrenden Diskussionen und die Hilfe bei der Abfassung des Manuskriptes der Arbeit.

Ebenso sei den Mitarbeitern der Abteilung Forschung und Entwicklung des VEB Bergwerksmaschinen Dietlas, namentlich den Kollegen Dr.-Ing. M. Schäfer und Dipl.-Ing. K. Gotthard, für die stete Unterstützung bei der Bereitstellung der Untersuchungsobjekte und dem der Arbeit entgegengebrachten Interesse.

Für die Hilfe bei der Durchführung von Experimenten und Messungen gebührt dem Kollektiv des Musterbaues im VEB Bergwerksmaschinen Dietlas unter Leitung von Kollegen F. Schleicher sowie dem Kollektiv der Abteilung Industrievermessung des VEB Kombinat Kali Merkers, besonders Dipl.-Ing. M. Schmidt, mein herzlicher Dank.

Herrn M. Keller, VEB Baugrund Berlin, möchte ich für die Unterstützung bei den Literaturrecherchen danken.

Ein herzlicher Dank gilt ebenso meiner Familie, insbesondere meiner Frau Helga für ihr Verständnis und die Hilfe bei der Anfertigung der Arbeit.

0. Einleitung

=====

Kalialze stellen in der Volkswirtschaft der DDR wichtige Rohstoffe der chemischen Industrie sowie für die Anwendung in der Landwirtschaft dar. Darüberhinaus sind sie bedeutende Exportgüter, deren effektive Gewinnung und Verarbeitung eine vordringliche Aufgabe ist.

Im Streckenvortrieb werden im Erz- und Kalibergbau international und in der DDR unter Nutzung der Sprengtechnologie Bohrwagen eingesetzt, die dem Einbringen der Löcher zur Aufnahme des Sprengstoffes dienen. Zur Sicherung eines hohen Abschlagwirkungsgrades werden an diese Löcher große Anforderungen bezüglich der Genauigkeit von Position und Richtung gestellt. Um diese Forderungen zu realisieren, ist eine Parallelführung der Lafette notwendig. Für die definierte Ansteuerung der Antriebe ist eine Parallelitätsbedingung unter Berücksichtigung aller Einflußfaktoren zu formulieren, mit deren Hilfe eine Bestimmung der Antriebsführungsgrößen ermöglicht wird.

Weiterhin ist zur Erhöhung von Effektivität und Qualität des Abschlages eine Verringerung des dazu notwendigen Zeitaufwandes zu erreichen. Da die reine Bohrzeit zum Einbringen des Bohrloches nicht wesentlich verkürzt werden kann, ist die Senkung des Zeitaufwandes für Einrichtung und Positionierung der Lafette notwendig.

Diese Forderungen sind nur mit der Erhöhung des Automatisierungsgrades zu verwirklichen, die gleichzeitig zu Verbesserungen der Arbeitsbedingungen für das Bedienpersonal führen. Die dazu notwendigen Untersuchungen sind effektiv nur mit Modellierung und Simulation durchführbar. Dabei nimmt die Modellbildung zur Widerspiegelung der realen Verhältnisse eine zentrale Stellung ein. Auf Grund der Komplexität der Aufgaben ist der Einsatz der Rechentechnik erforderlich.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich deshalb mit Grundsatzuntersuchungen zur Modellierung des Positioniervorganges und deren Bewertung. Unter Berücksichtigung der Einflußfaktoren auf die Positionierung wird eine Parallelitätsbedingung formuliert, an einem Bohrwagen zur Ansteuerung der Antriebe benützt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit durch einen Vergleich mit Meßwerten bewertet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Varianten der Antriebsansteuerung abgeleitet, Möglichkeiten der Automatisierung des Bohrprozesses untersucht und Wege zur Realisierung aufgezeigt.

Die Arbeit entstand im Rahmen eines 1986 abgeschlossenen Forschungsvertrages (siehe auch /1/ und /2/) zwischen dem VEB Bergwerksmaschinen Dietlas als alleinigem Entwickler und Produzenten von Kalibohrwagen in der DDR und der Technischen Hochschule Ilmenau.

In die vorliegenden Untersuchungen fließen auch Ergebnisse betreuter Diplomarbeiten ein, auf die an den entsprechenden Stellen verwiesen wird. In diesen Arbeiten sind Teilthemen zur Modellierung, Lafettenpositionierung, Antriebsregelung und zu Realisierungsvarianten ausführlich dargestellt.

Alle entwickelten Schaltungen, Konstruktionen und die ausgedruckten Hauptprogrammlistings sind in /3/ zusammengefaßt.

Eine Zusammenstellung der erstellten Mikrorechnerprogramme ist in Anlage 6 enthalten.

1. Internationaler Stand und Zielstellung der Arbeit

=====

1.1. Antriebsansteuerungen bei Bohrwagen zur Bohrspindelpositionierung unter dem Gesichtspunkt der Lafettenparallelführung

Aus der Literatur sind unterschiedliche Varianten zur Ansteuerung der Bohrarm- und Lafettenantriebe bekannt. Dabei werden auf Grund der großen zu bewegendenden Massen und der dadurch zu realisierenden Kräfte für die Lafettenpositionierung fast ausschließlich Hydraulikantriebe verwendet.

Bei den meisten Bohrwagen erfolgt die Steuerung dieser Hydraulikantriebe durch Handbedienung. Der Ölstrom wird dabei entweder direkt mit Handsteuerventilen oder indirekt über elektrisch betätigte Wegeventile beeinflusst. Die Parallelität der Lafette zu einer Bezugsstellung wird während der Positionierung und in der Endposition nur von Augenmaß und Geschick des Bedieners bestimmt. Ohne weitere Hilfsmittel (z.B. Diaprojektoren) sind auf Grund des Abstandes des Bedieners von der Ortsbrust Positionsabweichungen von mehreren Zentimetern und Richtungsabweichungen von mehr als 2 cm/m zu erwarten /4/ /5/. Die in Untersuchungen zur Verbesserung des Abschlagwirkungsgrades ermittelte maximale Grenze der Richtungsabweichung von 1 cm/m, die auch für die vorliegende Arbeit als Qualitätsmaßstab verwendet wurde, ist durch die Handsteuerung in keinen Fall erreichbar.

Als erste Entwicklungen zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit wurden mechanische Parallelführungen eingesetzt /5/. Diese erreichten die Parallelführung der Lafette durch Gestängeanordnungen zwischen Chassis und Lafette, wobei als Kriterium der Parallelität ein Winkelvergleich in horizontaler und vertikaler Bewegungsrichtung diene. Neben besonderen Anforderungen bei der konstruktiven Anordnung der Gelenke war im Grubenbetrieb ggf. eine parallele Ausrichtung des Bohrwagens zur Großbohrlochachse erforderlich. Weitere Nachteile

mußten durch nicht korrigierbare Richtungsänderungen beim Andrücken der Lafettenspitze an die Ortsbrust sowie wegen der Empfindlichkeit der Gestänge gegenüber Verbiegung in Kauf genommen werden.

Im VEB Bergwerksmaschinen Dietlas wurde ein Bohrwagen mit diesem Parallelführungsprinzip entwickelt. Die Steuerung der Antriebe erfolgte über Wegeventile mit mechanischer Betätigung von Hand, mit denen eine feinfühlig Positionierung möglich war. Die Lafettenbewegung und damit deren Parallelführung wurde durch eine mit Gestängen zwischen Bohrarm und Lafette hergestellte Parallelogrammführung erreicht, die den mechanischen Winkelvergleich in horizontaler und vertikaler Richtung realisierten. Die Gestänge waren nachstellbar, sodaß an die Aufstellung des Bohrwagens bezüglich der Ortsbrust nicht so hohe Forderungen gestellt werden mußten. Obwohl mit diesem Bohrwagen eine verbesserte, vor allem gleichmäßigere Lafettenpositionierung erreicht wurde, verhinderten die Anfälligkeit der Gestänge gegen Verbiegungen, die Positionierungsprobleme bei zunehmenden Gelenkspielen sowie die aufwendige Einstellung der Gestänge einen umfangreichen Einsatz im Grubenbetrieb.

Eine Verringerung der mechanischen Anfälligkeit brachte die Umsetzung des Winkelvergleiches zur Parallelführung in einer Hydraulikanordnung, die nach dem Prinzip gleicher Volumina arbeitet und wie bei der mechanischen Parallelführung besondere Gelenkanordnungen voraussetzt. Diese werden bei Bohrloch-längen bis ca. 3 m häufig im Erzbergbau eingesetzt /4/. An 2 Beispielen wird die Funktion erläutert.

Der "Alpenjumbo Minbo 27 PRL" der Firma Böhler /6/ besitzt eine hydraulische Parallelführung. Zwischen Bohrarm und Gestell angebrachte Zusatzzylinder für horizontale und vertikale Bewegung, die direkt mit den entsprechenden Zylindern für die Lafettenbewegung verbunden sind, übertragen eine durch den Hauptantrieb des Bohrarms hervorgerufene Bewegung des Bohrarms durch die Pumpwirkung der Zusatzzylinder in eine Lafettenbewegung. Das Schema ist Abbildung 1 zu entnehmen.

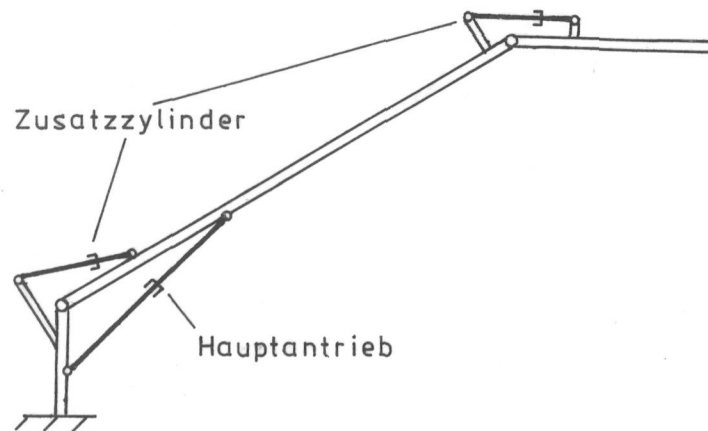


Abbildung 1: Hydraulische Parallelführung, Prinzip

Auch am Hydraulikbohrarm BUT 30 der Firma Atlas Copco /7/ wird das Prinzip der hydraulischen Parallelführung verwendet, jedoch wurde die Anordnung der Antriebszylinder verändert. Abbildung 2 zeigt schematisch die Zylinderanordnung. Die damit verbundene Reduzierung der Anzahl von Hydraulikzylindern führt zu einer Verbesserung des Positionierverhaltens, erfordert jedoch zur Erzeugung definierter Bewegungsbahnen einen erhöhten Steuerungsaufwand.

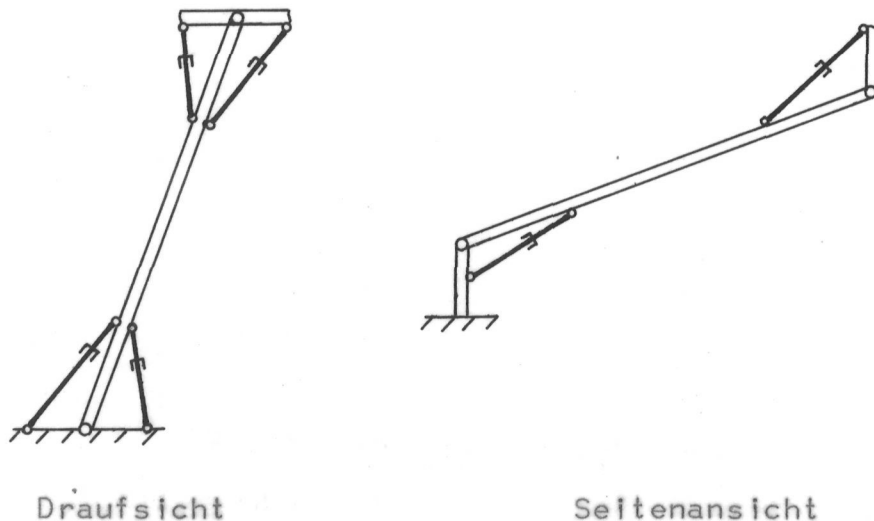


Abbildung 2: Zylinderanordnung am BUT 30

Das Prinzip der hydraulischen Parallelführung kann jedoch auf Grund größer werdender Ungenauigkeiten durch Ölkompensation und

Leckverluste bei Lafettenlängen von 5 bis 7 m die zugrundeliegende Parallelitätsbedingung nicht einhalten, weshalb es im Kalibergbau nicht verwendbar ist.

Elektrisch betätigte Hydraulikventile ermöglichen den zunehmenden Einsatz von sogenannten elektrohydraulischen Parallelführungen. Dabei wird eine definierte Parallelitätsbedingung zur Lafettenführung in elektrische Steuerspannungen zur Ansteuerung der entsprechenden Hydraulikantriebe umgesetzt.

Bei einfachen Ausführungen wurden dazu an Konstruktionen der mechanischen oder hydraulischen Parallelführung Meßgeber (Drehmelder, Potentiometer) angebracht, deren Ausgangssignale eine genäherte Parallelführung durch einen Winkelvergleich in horizontaler und vertikaler Richtung und damit eine entsprechende Antriebssteuerung ermöglichen.

Der im VEB Bergwerksmaschinen Dietlas entwickelte Bohrwagen SB 2/1 PL benutzt dieses Prinzip unter Verwendung von Präzisionspotentiometern als Winkelsensoren, welches in /8/ erläutert wird. Abbildung 3 verdeutlicht den Sachverhalt.

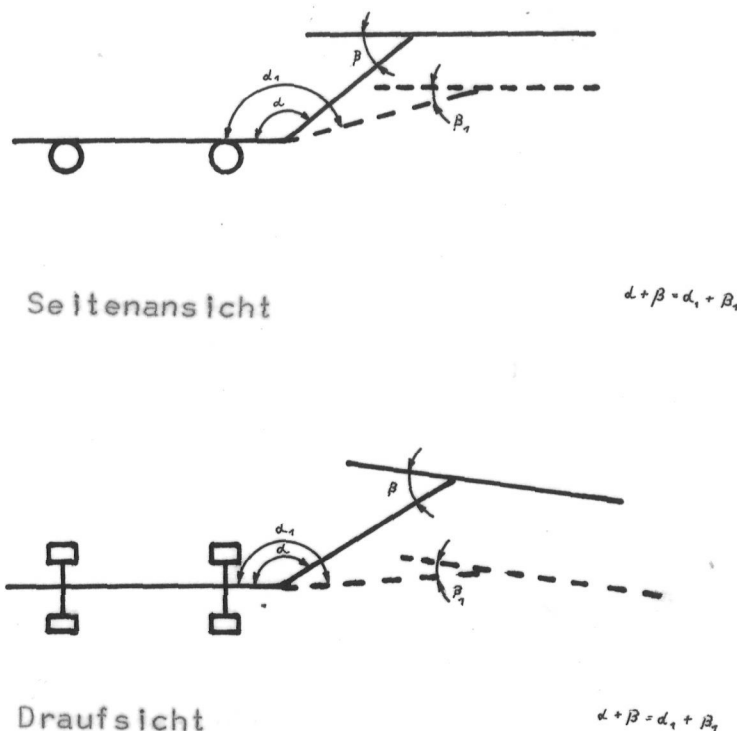


Abbildung 3: Winkelvergleich am Bohrwagen SB 2/1 PL, schematisch

Konstruktiv wird die Winkelsumme auf eine Widerstandssumme zurückgeführt, wobei die Widerstandsänderung proportional der Gelenkstellungsänderung ist. Die eingesetzten elektrohydraulischen Wegeventile mit Ein- Aus- Charakteristik erwiesen sich jedoch für eine genaue und schnelle Positionierung als ungeeignet. Darüberhinaus traten Probleme bei der Zuverlässigkeit von Gebern und Hilfskonstruktionen auf. Untersuchungen zur erreichten Positioniergenauigkeit in /5/ und /9/ und zur Verkürzung der Einrichtzeiten in /5/ belegen die erreichten Verbesserungen gegenüber der Handsteuerung, jedoch kann das Prinzip des Winkelvergleichs ohne Berücksichtigung weiterer Einflußfaktoren die Genauigkeitsforderung von 1 cm/m nicht erbringen (siehe auch /10/), wie in dieser Arbeit nachgewiesen wird.

Die Firma Salzgitter AG bietet parallelgeführte Bohrwagen für unterschiedliche Einsatzfälle an. Der BW 32 R /11/ ist vorwiegend für den Tunnelbau konzipiert und besitzt neben der automatischen Lafettenparallelführung eine Bohrrarmanordnung mit horizontal liegendem Bohrarmhauptgelenk. Durch diese Anordnung wird die Anzahl der Freiheitsgrade gegenüber dem SB 2/1 PL von 7 auf 5 gesenkt und damit eine Reduzierung des Steuerungsaufwandes erreicht. Bei parallel zur Wagenachse ausgerichteter Lafette beschränkt sich die Parallelführung auf die Ausregelung der Bewegung des Bohrarmhubantriebs an der Lafette. Durch den gekröpften Bohrarm gibt es keine durch die Gelenkanordnung nicht erreichbaren Punkte auf der Bohrebene, das heißt es existiert kein Bohrschatten.

Der BW 45 der gleichen Firma wird auf Wunsch mit einer Lafettenparallelführung ausgerüstet, die als Nachrüstsatz für andere Bohrwagen ebenso verwendbar ist (/12/ /13/). Die Steuerung besteht aus Sensoren an den Gelenkpunkten, dem Lafettenträger und der Lafettenspitze (als Crashtaster) zur Erfassung der Ist- Werte der Gelenkstellungen sowie einem frei programmierbaren Mikroprozessor, der die Sollwertvorgabe und Ansteuerung der Antriebe realisiert. Verfügbar sind die Betriebsarten Handbetrieb, rechnerunterstützter Handbetrieb (paralleles Nachführen der Lafette) und Automatikbetrieb zur

vollautomatischen Bohrbildabbildung, wobei bei Automatikbetrieb die Positionierung lage- und geschwindigkeitsgeregelt erfolgt. Angaben zu verwendeten Sensoren, zum Steuerungsprinzip und zur erreichten Genauigkeit fehlen.

Bereits 1979 wurde von der schwedischen Firma Linden- Alimak ein Bohrwagen vorgestellt, der mit einem elektronischen Winkelmeßsystem ausgerüstet war. Ob dieses System jedoch lediglich zu Anzeigezwecken oder zur Antriebssteuerung verwendet wurde, ist nicht bekannt.

In /14/ wird auf einen vollautomatischen Bohrwagen der Deutschen Montabert GmbH verwiesen, der das automatische Bohren aller Sprenglöcher mittels Mikrorechnersteuerung ermöglicht. Die Winkelsensoren gestatten eine räumliche Lafetteneinstellung mit einer Genauigkeit von besser 20 Winkelminuten, was einer Abweichung von etwa 0,6 cm/m entspricht. Ebenso ist die Positionierung auf Zentimeter genau. Weiterhin werden für das Umsetzen der Lafette zwischen 2 Bohrlöchern Zeiten von unter 10 s angegeben, wogegen für das Umsetzen von Hand ca. 24 s veranschlagt werden.

Die wohl technisch am weitesten fortgeschrittene Lösung eines automatischen Bohrwagens dürfte derzeit der Datamatic HS 305 M der Firma Tamrock /15/ sein. Das vorwiegend für den Tunnelbau konzipierte Gerät ermöglicht mit einer Mikroprozessorsteuerung die unabhängige, parallelgeführte Bewegung von 3 Bohrarmen, deren Konstruktion der des BW 32 R in /11/ ähnelt. Die genaue Einrichtung des Gerätes wird durch ein Lasermeßsystem unterstützt. Ein umfangreiches Bedienungspult ermöglicht dem Bediener weitreichende Möglichkeiten der Lafettenpositionierung, wobei über Bildschirm wichtige aktuelle Bohrdaten (Lafettenlage, Vorschubleistungen, Bohrschema) angezeigt werden.

1.2. Erläuterung der Aufgabenstellung und Abgrenzung

Im Rahmen des derzeitigen technologischen Prozesses sind zum Einbringen der Sprenglöcher folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Ausrichten des Bohrwagens vor der Ortsbrust unter Berücksichtigung der Lage des Bohrschattens
2. Erfassen der Großlochrichtung
3. Positionierung der Lafette
4. Einbringen des Bohrloches

Dabei wiederholen sich die Arbeitsgänge 3 und 4 bis zur vollständigen Abbohrung des Abschlages.

Die Ausrichtung des Bohrwagens erfolgt nach Einfahren in die Abbaustrecke und Abstellen vor der Ortsbrust durch Ausfahren der Stützzylinder. Zur Zeit dient ein aus dem Großloch herausragendes Ende eines hineingeschobenen Ladestockes dem Bohrwagenfahrer als Richtungsorientierung zur Lafettenausrichtung. Da keine weiteren Hilfsmittel vorhanden sind, ist die Einrichtung von Augenmaß und Geschick des Bohrhauers abhängig. Die genaue Positionierung der Lafette wird weiterhin dadurch erschwert, daß zur Antriebsansteuerung von Hand betätigte Wegeventile verwendet werden, die eine digitale Schaltfunktion besitzen. Damit werden einerseits Schwingungen eingeleitet, die eine Verlängerung der Positionierzeit und eine erhöhte Belastung der Gelenke zur Folge haben. Andererseits ist auf Grund der Ventilschaltzeiten, die eine Mindestbewegung verursachen, keine genaue Positionierung möglich. Die genannten Effekte sind auch durch Einschalten einer zusätzlichen hydraulischen Dämpfung nicht vollständig zu beseitigen. Durch sie wird der Ölstrom im jeweiligen Antrieb verringert und somit die Positioniergeschwindigkeit herabgesetzt.

Auf Grund der Hydraulikkreisgestaltung ist ein gleichzeitiges Betätigen mehrerer Antriebe in einem Ölkreislauf ohne gegen-

seitige Beeinflussung nicht möglich. Dadurch vergrößert sich der zur Lafettenpositionierung notwendige Mindestzeitaufwand. Das Anfahren des nächsten Bohrloches wird durch Betätigung der den Antrieben zugeordneten Tasten am Bedienpult erreicht. Das gesamte Bohrschema wird dabei stark subjektiv vom Bohrwagenfahrer gestaltet und ist unter den genannten Bedingungen nicht reproduzierbar.

Das Bohren des Loches selbst erfolgt nach Andrücken der Lafette an die Ortsbrust durch Einschalten von Bohr- und Vorschubantrieb.

Hauptnachteil der gegenwärtig im Grubenbetrieb eingesetzten Sprenglochbohrwagen SB 2/1 und SB 2/2 ist die mit ihnen nur ungenau mögliche und zeitaufwendige Positions- und Richtungseinstellung der Lafette. Gerade die Ausrichtung der Lafette parallel zur Großlochachse ist zumindest für die Löcher des Einbruches aus sprengtechnischer Sicht ein Erfordernis zur Sicherung eines hohen Abschlagwirkungsgrades.

Zur Beseitigung der aufgezeigten Nachteile werden in der vorliegenden Arbeit Grundsatzuntersuchungen zur Erhöhung des Automatisierungsgrades durchgeführt, die der Vorbereitung von Leitungsentscheidungen für die weitere Bohrwagenentwicklung dienen. Dabei ist insbesondere die Beantwortung folgender Fragen von Bedeutung:

- Sind Bohrwagenkonstruktionen und Gelenkbewegungen mit Hilfe von Modellierung und Simulation analysierbar ?
- Ist mit den vorhandenen Konstruktionen von SB 2/1 und SB 2/2 eine Automatisierung des Positioniervorganges möglich und welche Veränderungen sind zur Erhöhung der Effektivität notwendig ?
- Welche Realisierungsvarianten und -etappen sind zur Erhöhung des Automatisierungsgrades erforderlich ?
- Welche Größen haben Einfluß auf die Lafettenführung ?
- Ist eine Parallelitätsbedingung zur Lafettenführung angebbar und wie lassen sich daraus die Antriebsführungsgrößen ermitteln ?
- Welchen Einfluß hat die Art der Antriebsansteuerung auf die Lafettenpositionierung ?

- Sind für die Abarbeitung eines Bohrschemas die Gelenkstellungen eindeutig aus Bohrposition und -richtung bestimmbar ?
- Welcher technische Aufwand ist zur Erreichung einer bestimmten Positioniergenauigkeit notwendig ?
- Welche Einflüsse ergeben sich für den technologischen Prozeß im Grubenbetrieb ?

Zur praktischen Überprüfung der Ergebnisse, die den prinzipiellen Nachweis der Richtigkeit gefundener Lösungen dienen, und zur Durchführung von Messungen war der Aufbau eines Experimentiersystems erforderlich. Die dazu geschaffenen Hard- und Softwarekomponenten erfüllen nicht in allen Punkten den Anspruch an produktionsreife Lösungen.

Für die praktischen Untersuchungen zur Lafettenparallelführung sind bei der Ansteuerung der Antriebe Einschränkungen notwendig, die insbesondere in der Hydraulikkreisgestaltung des verwendeten SB 2/2 begründet sind. Die Betätigung zweier Antriebe eines Hydraulikkreislaufes ist ohne gegenseitige Beeinflussung nicht möglich. Darüberhinaus waren am Meßobjekt nur für die Funktionen "Bohrarm heben/senken", "Lafette kippen" und "Lafette schwenken" Proportionalstromregelventile vorhanden. Zur Sicherung der Gesamtaussage der Arbeit wurde deshalb bei der Untersuchung des dynamischen Verhaltens die Lafettenpositionierung nur in vertikaler Richtung und mit konstanter Lafettenausfahrlänge durchgeführt.

Aus den aufgezeigten derzeitigen Bedingungen im Bohrprozeß und den dargestellten Fragenkomplexen ergeben sich als Schwerpunkte für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit:

1. Modellierung des kinematischen Gesamtsystems von Bohrwagen
2. Herausarbeitung von Ansteuervarianten der Antriebe zur definierten Bewegung der Lafette bei Verbesserung des Bewegungsverhaltens

3. Formulierung der Parallelitätsbedingung der Lafettenführung und Ableitung der Ansteuerfunktionen der Antriebe
4. Herausarbeiten von Realisierungsvarianten und -etappen unter Angabe des notwendigen Aufwandes und der zu erreichenden Effekte

Die geschaffenen Modelle und Aufbauten sowie die durchgeführten Messungen werden im Rahmen dieser Arbeit dargestellt, bewertet und Schlußfolgerungen für die Weiterentwicklung von Bohrwagen gezogen.

2. Modellierung

=====

2.1. Zielstellung der Modellbildung

Untersuchungen am Realobjekt sind häufig mit einem großen Aufwand, besonders an Meßtechnik verbunden, der durch die Untersuchungsergebnisse nicht immer gerechtfertigt werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt dient die Modellbildung mit der möglichst wirklichkeitsgetreuen Widerspiegelung der realen Verhältnisse zur Vorbereitung von Untersuchungen, die mit eben diesen Modellen effektiver durchführbar sind.

So können u. a. Steuer- und Regelalgorithmen zur Automatisierung des Bewegungsablaufes eines Sprechlochbohrwagens bestimmt werden. Die dazu notwendige Erarbeitung von theoretischen Grundlagen zur Beschreibung des statischen und dynamischen Verhaltens des Bohrwagens ist ein Prozeß, im Rahmen dessen sowohl theoretisch als auch meßtechnisch gewonnene Erkenntnisse einfließen. Dies begründet sich daraus, daß der Einfluß unterschiedlicher Materialien und Querschnittsprofile, des Spieles der Gelenke, der Einsatz unterschiedlicher Hydraulikantriebe und die fertigungsbedingte Verschiedenartigkeit der einzelnen Bohrwagen in seiner Gesamtheit nicht von vornherein in geschlossener Form mathematisch angebar sind. Messungen und deren Auswertung sind deshalb ein wesentlicher Teil des Modellbildungsprozesses.

Entsprechend der Gesamtzielstellung der Arbeit sind mit den Modellen Untersuchungen zu folgenden Schwerpunkten durchzuführen:

- Analyse des Schwingverhaltens des Bohrarmes bei unterschiedlichen Ansteuerungen der Antriebe zur Beurteilung der gegenwärtig eingesetzten Wegeventile mit Ein- Aus- Charakteristik sowie zur Verbesserung der Ansteuerung
- Bestimmung der Grenzen der Modelle

- Darlegung von Möglichkeiten der Modellverbesserung
- Beurteilung des Einsatzes von Steuerungen und Regelungen zur Positionierung der Lafette
- Einschätzung des Aufwandes zur Erreichung bestimmter Qualitätsparameter (z.B. Positioniergenauigkeit)

Dazu war es notwendig Modelle zu schaffen, die

- eine Analyse des Zusammenhanges zwischen Gelenkstellungen und Bohrposition sowie Bohrrichtung ermöglichen,
- die Untersuchung der Verhältnisse im Hydrauliksystem gestatten,
- eine Einschätzung des dynamischen Verhaltens des Bohrarmes erlauben.

Die einzelnen Modelle sowie die Bedingungen zu ihrer Anwendung werden in den folgenden Abschnitten erläutert und bewertet.

2.2. Einführung von Koordinatensystemen zur Beschreibung des kinematischen Modells

2.2.1. Die Denavit- Hartenberg- Notation

Zur Beschreibung der geometrischen Beziehungen am Bohrwagen sowie der Bohrposition und der Bohrrichtung bei unterschiedlichen Gelenkstellungen wird in jedem Gelenk des Bohrarmes ein Koordinatensystem eingeführt. Durch Transformationsbeziehungen läßt sich jeder Punkt eines beliebigen Koordinatensystems bezüglich eines anderen beschreiben. Um die Anzahl der zur Transformation notwendigen Parameter einzuschränken, wurden die Koordinatensysteme nach der Hartenberg- Denavit- Notation eingeführt (siehe Abbildung 4), die ein Starrkörpermodell der Gelenkverbindungen voraussetzt und bei der durch Zwangsbedingungen die Zahl der Transformationsparameter von 6 auf 4 verringert wird.

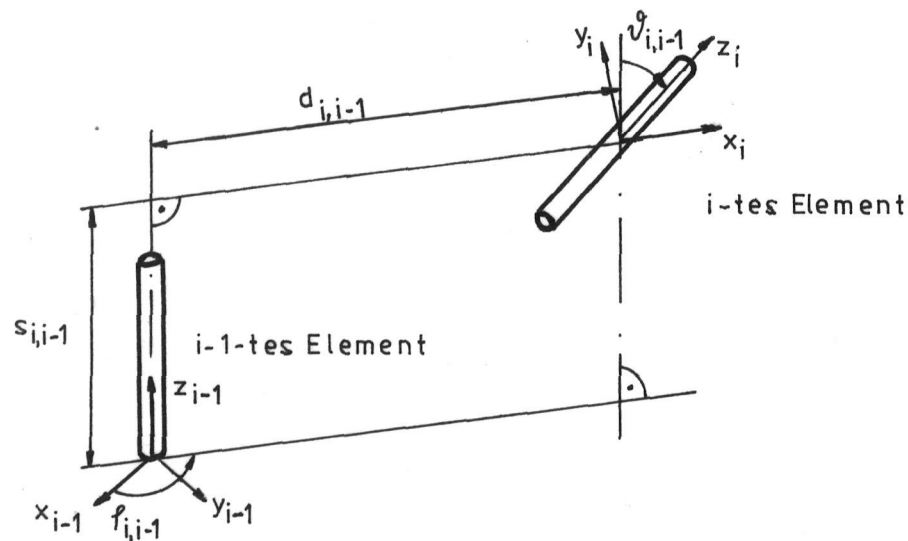


Abbildung 4: zur Hartenberg- Denavit- Notation

Die folgebld Beschreibung von Abbildung 4 wurde aus /16/ übernommen:

- die z_{i-1} -Achse liegt in der Bewegungsachse des Übertragungsgliedes i
- die x_i - Achse steht senkrecht auf der z_{i-1} - Achse (Schnittpunkt bei $z_{i-1} = s_{i,i-1}$) und zeigt von ihr weg

Die jeweils zwei Rotations- und zwei Translationsgrößen werden wie folgt festgelegt:

- der Winkel $\varphi_{i,i-1}$ bezeichnet die Rotation der Achse x_{i-1} um die Achse z_{i-1} , bis sie parallel zu x_i ist
- der Abstand $s_{i,i-1}$ bezeichnet die Translation entlang der Achse z_{i-1} , bis der Abstand von x_{i-1} und x_i gleich null ist
- der Abstand $d_{i,i-1}$ bestimmt die Translation entlang der Achse x_i , damit die Ursprünge O_i und O_{i-1} deckungsgleich sind
- der Winkel $\vartheta_{i,i-1}$ bezeichnet die Rotation der z_{i-1} - Achse um die Achse x_i bis zur Erreichung der Parallelität von z_i und z_{i-1}

Die Größen $\rho_{i,i-1}$ und $s_{i,i-1}$ werden allgemein als Gelenkkoodinaten q_n bezeichnet.

Die Transformationsmatrix $A_{i,i-1}$ beschreibt die Zusammenhänge zwischen den Koordinatensystemen i und $i-1$ und hat die Form

$$A_{i,i-1} = \begin{vmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \quad (1)$$

mit

$$\begin{aligned} a_{00} &= 1 & a_{01} &= 0 \\ a_{02} &= 0 & a_{03} &= 0 \\ a_{10} &= d_{i,i-1} \cdot \cos \rho_{i,i-1} & a_{11} &= \cos \rho_{i,i-1} \\ a_{12} &= -\sin \rho_{i,i-1} \cdot \cos \vartheta_{i,i-1} & a_{13} &= \sin \rho_{i,i-1} \cdot \sin \vartheta_{i,i-1} \\ a_{20} &= d_{i,i-1} \cdot \sin \rho_{i,i-1} & a_{21} &= \sin \rho_{i,i-1} \\ a_{22} &= \cos \rho_{i,i-1} \cdot \cos \vartheta_{i,i-1} & a_{23} &= -\cos \rho_{i,i-1} \cdot \sin \vartheta_{i,i-1} \\ a_{30} &= s_{i,i-1} & a_{31} &= 0 \\ a_{32} &= \sin \vartheta_{i,i-1} & a_{33} &= \cos \vartheta_{i,i-1} \end{aligned}$$

Die Beschreibung der Lage eines Punktes $P_{i,i}$ mit den Komponenten $(1, P_{i,i;x}, P_{i,i;y}, P_{i,i;z})$ des Koordinatensystems i im Koordinatensystem $i-1$ erfolgt nach Gleichung (2)

$$P_{i,i-1} = A_{i,i-1} \cdot P_{i,i} \quad (2)$$

Soll die Lage eines Punktes $P_{i,i}$ des Koordinatensystems i in einem beliebigen anderen Koordinatensystem j beschrieben werden, so ist mit der Bildung der Transformationsmatrix

$$A_{i,j} = A_{j+1,j} \cdot A_{j+2,j+1} \cdot \dots \cdot A_{i-1,i-2} \cdot A_{i,i-1}, \quad (3)$$

die die Position und Orientierung des Koordinatensystems i im Koordinatensystem j enthält, die Berechnung analog zu Gleichung (2) mit

$$P_{i,j} = A_{i,j} * P_{i,i} \quad (4)$$

durchzuführen.

Die Matrixelemente a_{11} bis a_{33} der Matrix $A_{i,j}$ bestehen aus Kombinationen aller Parameter der multiplizierten Matrizen.

Die Transformationsmatrizen $A_{i,j}$ stellen den Bezug zwischen den Gelenkkordinaten q_n und den kartesischen Koordinaten des Bezugssystems x_j, y_j, z_j her. Dabei ist die Berechnung kartesischer Koordinaten aus Gelenkkordinaten (Hintransformation) stets eindeutig, wogegen die Umkehrrechnung (Rücktransformation) im allgemeinen nicht eindeutig ist /17/. Dies ist aus der Redundanz von Systemen zu erklären, bei denen eine Position und Orientierung eines Objektes durch verschiedene Gelenkstellungen erreichbar ist. Eindeutigkeit wird für diese Systeme durch die Einführung von Zwangsbedingungen erreicht, die einen festen, mathematisch formulierbaren Zusammenhang zwischen Gelenkkordinaten darstellen. Diese sind jeweils aus der konkreten Anordnung sowie den geforderten Bahnkurven abzuleiten und bedeuten letztlich eine Reduzierung des Freiheitsgrades.

Allgemein ist mit dem Freiheitsgrad sechs die Forderung nach beliebiger Position und Orientierung eines Objektes im Raum erfüllbar. Für den Bohrwagen erfordert dies die Reduzierung des Freiheitsgrades um eins zur Beseitigung der Redundanz bezüglich der Lafettenpositionierung.

Grundsätzlich bestehen dazu zwei Möglichkeiten:

1. Einführung von festen Abhängigkeiten zwischen zwei Gelenken
2. Zuordnung eines festen Wertes für ein Gelenk

Auf Grund der vorliegenden Anordnung der Gelenke sowie der Gegebenheiten im technologischen Prozeß wird zur Sicherung

einer freien Wahl aller Gelenkkoordinaten der Teleskopausfahr-
länge $s_{3,2}$ ein konstanter Wert während der Transformation
zugewiesen. Vor der Transformation ist $s_{3,2}$ im Rahmen des
Variationsbereiches veränderbar. Die Realisierung innerhalb
der Modelle ist im Abschnitt 2.3. dargestellt.

2.2.2. Berücksichtigung des Einflusses der Biegung

Die für die Denavit- Hartenberg- Notation getroffene Festle-
gung der Starrkörpermodellierung ist nicht auf alle mechani-
schen Konstruktionen anwendbar. Besonders bei Bauteilen mit
großem Längen- Querschnittsverhältnis ist mit Durchbiegungen
zu rechnen, die nicht vernachlässigt werden können. Zwischen
Positionsverschiebung und Richtungsabweichung infolge der
Biegung besteht ein fester Zusammenhang, der jedoch von der
Auflagergestaltung abhängt, weshalb die Modellierung von Bohr-
arm und Lafette unterschiedlich ist.

Der Einfluß der Biegung der Lafette auf die Positionierung
wird in Abbildung 5 verdeutlicht.



Abbildung 5: Durchbiegung der Lafette

Der Punkt A ist der vordere Auflagerpunkt der Lafette in der
Tragkonstruktion.

Es zeigen sich folgende Sachverhalte:

1. Die tatsächliche Position des Koordinatenursprungs 0_7 ist
 0_7 , die durch den Durchbiegungswinkel β , die Länge
 $\overline{AO_7}$ und die Durchbiegung $h_{7,6}$ beschrieben wird

2. Der Tangentenwinkel α repräsentiert die Richtungsabweichung von z_7 und damit die Abweichung der Bohrriechtung

Für die Lafette hängt die Durchbiegung lediglich von ihrer freien Ausfahrlänge $\overline{AO_7}$ ab und läßt sich nach /18/ für annähernd horizontale Ausrichtung mit der Gleichung

$$h_{7,6} = P_v \cdot \overline{AO_7}^3 / (8 \cdot E \cdot J) \quad (5)$$

und

$$E = 21 \cdot 10^4 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$J = 923 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$P_v = 0.56 \text{ Nm}^{-1} \cdot \overline{AO_7}$$

approximieren.

Durch Differentiation von $h_{7,6}$ läßt sich zu

$$\alpha = \arctan (dh_{7,6}/d\overline{AO_7})$$

$$\alpha = \arctan ((3 \cdot P_v \cdot \overline{AO_7}^2)/(8 \cdot E \cdot J)) \quad (6)$$

bestimmen. Mit

$$\beta = \arctan (h_{7,6}/\overline{AO_7}) \quad (7)$$

ergibt sich zwischen α und β der feste Zusammenhang

$$\beta = \alpha / 3 \quad (8)$$

Bei der Antriebsansteuerung ist zu beachten, daß auf Grund des in Gleichung (8) ausgedrückten Zusammenhanges zwischen α und β die Korrektur von Position und Richtung mit einem Antrieb nicht möglich ist.

Wird die Durchbiegung $h_{7,6}$ durch Drehung um den Durchbiegungswinkel β ausgeglichen, besteht noch eine Richtungsabweichung von $2 \cdot \beta$.

Erfolgt dagegen ein Ausgleich der Richtungsabweichung durch Drehung um den Tangentenwinkel α , so ergibt sich eine Posi-

tionsabweichung um $2 \cdot h_{7,6}$ über O_7 .

Die Durchbiegung des Bohrarms hängt nicht nur von der Teleskopausfahrlänge sondern auch von allen anderen Gelenkstellungen ab, sodaß ihre Modellierung erschwert wird. Abbildung 6 zeigt die Verhältnisse für horizontalen Bohrarm.

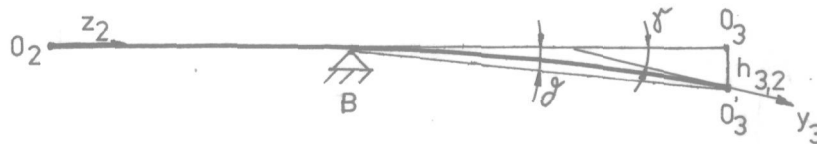


Abbildung 5: Durchbiegung des Bohrarmes

Der Punkt B ist der obere Anlenkpunkt des Bohrmhubzylinders. Analog zur Lafette ergeben sich zwei Sachverhalte:

1. Die tatsächliche Position des Koordinatenursprunges O_3 ist O_3 , die durch den Durchbiegungswinkel γ , die Länge $s_{3,2}$ ($= \overline{O_2 O_3}$) und die Durchbiegung $h_{3,2}$ beschrieben wird
2. Der Tangentenwinkel repräsentiert die Richtungsabweichung von x_3 und damit die des nachfolgenden Gelenkes

Der Durchbiegungswinkel γ läßt sich mit

$$\gamma = \arctan(h_{3,2}/s_{3,2}) \quad (9)$$

bestimmen.

Die Messungen nach Abschnitt 3.1. ergaben, daß die Durchbiegung des Bohrarmes insbesondere von den Größen $f_{2,1}$, $s_{3,2}$ und $s_{7,6}$ (siehe Abschnitt 2.2.4.) abhängig ist, sodaß der Einfluß der anderen Gelenkstellungen vernachlässigbar ist.

Mit

$$\arctan \gamma \approx \gamma \quad (10)$$

für kleine \mathcal{J} gilt

$$\mathcal{J} = h_{3,2}/s_{3,2} \quad (11)$$

und mit /59/

$$\alpha = \mathcal{J} * (2 * \overline{O_2B} + 3 * \overline{BO_3})/2 * \overline{BO_3} \quad (12)$$

Die Auswertung der Gleichung (12) ergibt, daß ebenso wie bei der Lafette die Korrektur von Position und Richtung nicht mit einem Antrieb möglich ist.

Auf die Umsetzung der Gleichungen wird im Abschnitt 2.3. eingegangen und der Vergleich mit Meßwerten erfolgt im Abschnitt 3.

Die Durchbiegungen von Bohrarm und Lafette führen zu Veränderungen in der Lage der Koordinatensysteme zueinander, sodaß die Voraussetzungen zur Anwendung der im Abschnitt 2.2.1. beschriebenen Denavit- Hartenberg- Notation für die Transformationsmatrizen $A_{3,2}$ und $A_{7,6}$ nicht gegeben sind. Zur Berücksichtigung der Biegung ist dort deshalb zur Koordinatentransformation die Verwendung neuer Transformationsbeziehungen erforderlich. Die Größen $h_{3,2}$, $\mathcal{J}_{3,2}$ und $h_{7,6}$ werden analog zu den Abbildungen 5 und 6 direkt in die Koordinatensysteme 2 und 3 bzw. 6 und 7 sowie in die dazugehörigen Transformationsmatrizen übernommen. α wird für beide Bohrwagen auf Grund der Anordnung der Koordinatensysteme 6 und 7 mit

$$\alpha = 360^\circ - \mathcal{J}_{7,6} \quad (13)$$

umgerechnet.

Die Veränderungen in den Transformationsmatrizen $A_{3,2}$ und $A_{7,6}$ sind den Anlagen 1 - 3 bzw. 1 - 7 für den SB 2/1 und den Anlagen 2 - 3 bzw. 2 - 7 für den SB 2/2 zu entnehmen.

2.2.3. Die Koordinatensysteme des Bohrwagens SB 2/1

Gemäß der kinematischen Struktur des Bohrwagens, die in Anlage 7 - 1 dargestellt ist, werden unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 2.2.1. und 2.2.2. getroffenen Festlegungen für den Bohrwagen SB 2/1 die in Anlage 1 dargestellten Koordinatensysteme eingeführt. Damit ist die Erfassung von Bohrarm- und Lafettendurchbiegung möglich. Die Ursprünge O_0, O_1, O_3, O_4, O_5 befinden sich in Drehhelenken und O_2, O_6, O_7 in Schubgelenken. Die Darstellung der kinematischen Struktur in Anlage 7 - 1 entspricht der Seitenansicht des Bohrwagens und enthält alle Koordinatensysteme.

Tabelle 1 zeigt die Gelenkkoordinaten sowie deren auftretende Maximal- und Minimalwerte.

Tabelle 1: Zuordnung der Gelenkkoordinaten am SB 2/1

$\ell_{i,i-1}$	q_n	Minimalwert	Maximalwert
$\ell_{1,0}$	q_1	135 grd	225 grd
$\ell_{2,1}$	q_2	255 grd	330 grd
$s_{3,2}$	q_3	2787 mm	4285 mm
$\ell_{4,3}$	q_4	30 grd	105 grd
$\ell_{5,4}$	q_5	225 grd	315 grd
$\ell_{6,5}$	q_6	0 grd	360 grd
$s_{7,6}$	q_7	3059 mm	8270 mm

Die konkreten Zahlenwerte der Parameter $s_{i,i-1}$, $d_{i,i-1}$, $\ell_{i,i-1}$ und $\vartheta_{i,i-1}$ der Denavit- Hartenberg- Notation sind der folgenden Tabelle 2 zu entnehmen, wobei für die Gelenkkoordinaten q_n die Werte der Grundstellung (Zeichnung Nr.421.140/1 in /19/) angegeben sind.

Tabelle 2: Parameterzusammenstellung zur
Koordinatentransformation am SB 2/1

Koord.- syst.	Koord.- syst.	$s_{i,i-1}$	$d_{i,i-1}$	$\rho_{i,i-1}$	$\varphi_{i,i-1}$
i	i-1	/mm/	/mm/	grd	grd
1	0	245	170	180	270
2	1	0	210	270	90
3	2	2787	0	180	90
4	3	0	170	90	270
5	4	0	0	270	270
6	5	0	680	270	0
7	6	3059	24	90	0

2.2.4. Die Koordinatensysteme des Bohrwagens SB 2/2

Analog zum Bohrwagen SB 2/1 wurden auch beim SB 2/2 entsprechend der in Anlage 7 - 2 dargestellten kinematischen Struktur des Bohrwagens SB 2/2 in allen Gelenken Koordinatensysteme nach den in den Abschnitten 2.2.1. und 2.2.2. getroffenen Festlegungen eingeführt. Damit ist sowohl die Bohrrarmdurchbiegung als auch die Lafettendurchbiegung im Modell erfaßt. Die Ursprünge O_0, O_1, O_3, O_4, O_5 befinden sich in Drehgelenken und O_2, O_6, O_7 in Schubgelenken. Eine ausführliche Darstellung einschließlich der Transformationsmatrizen ist Anlage 2 zu entnehmen.

Die Darstellung der kinematischen Struktur in Anlage 7 - 2 entspricht der Seitenansicht des Bohrwagens SB 2/2 und enthält alle Koordinatensysteme.

Tabelle 3 zeigt die Gelenkkordinaten sowie deren auftretende Maximal- und Minimalwerte.

Tabelle 3: Zuordnung der Gelenkoordinaten am SB 2/2

$\varphi_{i,i-1}$	q_n	Minimalwert	Maximalwert
$\varphi_{1,0}$	q_1	135 grd	225 grd
$\varphi_{2,1}$	q_2	255 grd	330 grd
$s_{3,2}$	q_3	2772 mm	4372 mm
$\varphi_{4,3}$	q_4	0 grd	360 grd
$\varphi_{5,4}$	q_5	30 grd	105 grd
$\varphi_{6,5}$	q_6	225 grd	315 grd
$s_{7,6}$	q_7	2300 mm	5992 mm

Die Parameter $s_{i,i-1}$, $d_{i,i-1}$, $\varphi_{i,i-1}$ und $\mathcal{J}_{i,i-1}$ der Denavit-Hartenberg-Notation sind der folgenden Tabelle 4 zu entnehmen, wobei für die Gelenkkoordinaten q_n die Werte der Grundstellung (Zeichnung Nr. 421.150 in /20/) angegeben sind.

Tabelle 4: Parameterzusammenstellung zur Koordinatentransformation am SB 2/2

Koord.- syst.	Koord.- syst.	$s_{i,i-1}$	$d_{i,i-1}$	$\varphi_{i,i-1}$	$\mathcal{J}_{i,i-1}$
i	i-1	/mm/	/mm/	grd	grd
1	0	245	170	180	270
2	1	0	224	270	90
3	2	2772	0	180	0
4	3	260	40	180	90
5	4	0	250	90	270
6	5	511	25	270	270
7	6	2300	0	0	0

2.2.5. Parallelitätsbedingung

Die Einhaltung der Parallelität der Lafette (genauer: der Bohrrichtung) zu einer Bezugsstellung, also konstante räumliche Orientierung in allen Bohrpositionen bei der Abarbeitung eines Bohrschemas stellt eine wesentliche Bedingung für die Antriebssteuerung des Bohrwagens dar.

Durch Einführung eines bohrerfesten Koordinatensystems I in der Lafettenspitze sowie eines bezüglich der Bohrebene festen Koordinatensystems e sind Position und Orientierung der Lafettenspitze prinzipiell durch Aufstellen der Transformationsmatrix $A_{I,e}$ eindeutig beschreibbar. Aus den Komponenten von $A_{I,e}$ lassen sich sogenannte Eulerwinkel θ , ϕ und ψ nach [21] berechnen, die die Orientierung der Lafettenspitze im Bohrenkoordinatensystem darstellen. Es gelten die Gleichungen

$$\theta = \arccos(a_{33}) \quad (14)$$

$$\phi = \arcsin(a_{31}/\sin\theta) \quad (15)$$

$$\psi = \arcsin(a_{13}/\sin\theta) \quad (16)$$

Damit ist die Parallelitätsbedingung für alle Positionen der Lafettenspitze allgemein in diesem Koordinatensystem formulierbar:

$$\theta = \theta(\text{Bezugsstellung}) \quad (17)$$

$$\phi = \phi(\text{Bezugsstellung}) \quad (18)$$

$$\psi = \psi(\text{Bezugsstellung}) \quad (19)$$

Position und Orientierung der Lafette werden von folgenden Einflußgrößen bestimmt:

- Gelenkkoordinaten
- Lage des Bohrwagens zur Bohrebene
- Durchbiegungen
- Torsion

- Ölkompresseion in den Hydraulikantrieben
- Gelenkspiele

Dabei sind Durchbiegungen, Torsion, Ölkompresseion und Gelenkspiele im allgemeinen Funktionen der Gelenkstellungen. Eine Lafettenparallelführung ist aber nur erreichbar, wenn diese Einflüsse erfaßbar, mathematisch formulierbar und in Antriebsführungsgrößen zur Bewegungssteuerung umsetzbar sind. Die dazu notwendige definierte Ansteuerung der Antriebe erfordert die Auflösung der Gleichungen (14) bis (16) nach den einzelnen Gelenkkoordinaten. Dies ist im allgemeinen ohne die Einführung von Zusatzbedingungen, die sich aus der geforderten Bewegung, der Bohrwagenlage und Zwangsbeziehungen zwischen den Gelenkkoordinaten ergeben, nicht möglich.

Im technologischen Prozeß kann innerhalb einer Bohrwagenaufstellung von einer konstanten Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene ausgegangen werden. Diese ist für die Modellierung nach Einführung eines bohrwagenfesten Koordinatensystems b mit einer linearen Transformation durch die Matrix $A_{b,e}$ beschreibbar. Die Gleichungen (14) bis (19) lassen sich somit gleichlautend für die Transformationsmatrix $A_{b,e}$ angeben. Damit wird die Parallelitätsbedingung unabhängig von der tatsächlichen Bohrebenenlage im Bohrwagenkoordinatensystem angegeben.

Die Erfassung der Bezugsstellung, zu der parallel verfahren werden soll, ist bei der praktischen Umsetzung der Parallelitätsbedingung notwendig. Dies erfolgt durch Ausrichten der Lafette in Richtung des Großloches (siehe Abschnitte 1 und 5). Für die Modellbildung ergibt sich daraus die Aufgabe, unter Berücksichtigung möglichst aller Einflußgrößen die Berechnung der Gelenkstellungen aus Position und Orientierung der Lafettenspitze im Bohrwagenkoordinatensystem b und damit die Ermittlung von Antriebsführungsgrößen unter Einhaltung der Parallelitätsbedingung zu ermöglichen.

In den geschaffenen Modellen werden folgende Einflußfaktoren der Positionierung berücksichtigt:

- Gelenkkoordinaten
- Biegung des Bohrarmes
- Biegung der Lafette.

Durch Einführung des bohrerfesten Koordinatensystems 7 in der Lafettenspitze und des Bohrwagenbezugssystems 0 nach Abschnitt 2.2.3. und 2.2.4. sind mit der Transformationsmatrix $A_{7,0}$ Lage und Orientierung der Lafette modellmäßig beschrieben.

Bezüglich Bohrposition und Bohrrichtung ist eine Verdrehung der Lafette um die Bohrerlängsachse z_7 unerheblich. Diese Verdrehung ist nur mit den Antrieben 6,5 beim SB 2/1 bzw. 4,3 beim SB 2/2 erreichbar. Auch im Grubenbetrieb werden diese Antriebe ausschließlich in Schritten von 90° eingestellt. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit wurde deshalb oben liegende Lafette mit

$$\varphi_{6,5} = 270^\circ \quad \text{für den SB 2/1} \quad (20)$$

bzw.

$$\varphi_{4,3} = 180^\circ \quad \text{für den SB 2/2} \quad (21)$$

in der gesamten Modellierung festgelegt.

Unter Beachtung aller erfaßter Einflußfaktoren lassen sich für die vorliegenden Gelenkanordnungen aus der Parallelitätsbedingung die Gleichungen für die Beziehungen zwischen den Gelenkkoordinaten ableiten.

$$WV = \varphi_{2,1} + \varphi_{4,3} - \alpha - \gamma = \text{konstant} \quad (22)$$

$$WH = \varphi_{1,0} + \varphi_{5,4} = \text{konstant} \quad (23)$$

für den SB 2/1 und

$$WV = \varphi_{2,1} + \varphi_{5,4} - \alpha - \gamma = \text{konstant} \quad (24)$$

$$WH = \varphi_{1,0} + \varphi_{5,5} = \text{konstant} \quad (25)$$

für den SB 2/2 .

Dabei sind α und γ Funktionen der Gelenkkoordinaten $\varphi_{2,1}$, $s_{3,2}$ und $s_{7,6}$. Das bedeutet aber, daß zwar die Parallelitätsbe-

dingung und auch die daraus abgeleiteten Bedingungen der horizontalen und vertikalen Winkelsumme der Gelenkkoordinaten in einem Bohrschema konstant sind, nicht jedoch der Zusammenhang zwischen $\varphi_{2,1}$ und $\varphi_{4,3}$ bzw. $\varphi_{5,4}$. Dieser ist für jede Gelenkstellung neu zu bestimmen. Darüberhinaus sind die Bedingungen für WW und WH an jedem Bohrwagen zur Vermeidung zusätzlicher Positionierfehler als Einheit zu betrachten.

2.3. Beschreibung der geschaffenen Modelle

2.3.1. Nutzung des Simulationssystems "DIMAN" zur Bohrwagensimulation

Das Simulationssystem "DIMAN" ist als blockorientiertes Großrechnersystem zur Untersuchung elektrischer Antriebe an der TU Dresden entwickelt worden /22/ /23/. Die Nutzbarkeit für die vorgesehenen Untersuchungen wurde durch Erweiterung des Blockvorrates und Verbesserung der Ausgabemöglichkeiten durch Einbindung eines Graphiksystems erreicht (/24/ /25/ /26/). Die jeweiligen Simulationsexperimente sind als Stapeljobs oder im Dialogbetrieb (unter TSO) durchführbar. "DIMAN" organisiert als Rahmensteuerprogramm den Aufruf der einzelnen Unterprogrammblöcke, deren richtige Zuordnung sowie die Ein- und Ausgabesteuerung. Im System stehen zur Simulation selbst mehrere Varianten von Parametervariationen und Ausgabesteuerungen zur Verfügung. Der Blockaufruf erfolgt mit dem Namen und der Angabe der Parameter.

Die nachfolgend beschriebenen Unterprogramme zur Koordinatentransformation, zur Kraft- und Momentberechnung sowie zur Proportionalventilmodellierung wurden unter Beachtung der Forderungen zur Programmentwicklung in /23/ /27/ und /28/ geschaffen, sind jedoch auch universell außerhalb von DIMAN verwendbar.

2.3.2. Koordinatentransformation

Zur Realisierung der Koordinatentransformation von Gelenk- in kartesische Koordinaten wurden die Unterprogramme "TRANSF", "MMULT", "VMULT" und "INVERS" zur Nutzung unter "DIMAN" geschaffen. Die verwendeten Berechnungsgrundlagen beziehen sich auf Ausführungen in /29/ /30/ und /31/.

Das Unterprogramm "TRANSF" erzeugt aus den eingegebenen Parametern $\rho_{i,i-1}$, $\vartheta_{i,i-1}$, $d_{i,i-1}$ und $s_{i,i-1}$ eine 4*4- Transformationsmatrix $A_{i,i-1}$ nach den Festlegungen zur Denavit- Hartenberg- Transformation im Abschnitt 2.2.1.

Mit dem Unterprogramm "MMULT" wird die Multiplikation zweier 4*4- Matrizen komponentenweise entsprechend der Matrizenetze realisiert. Unter Beachtung der aktuell zu übergebenden Matrizen ist durch mehrfachen Aufruf die Berechnung der Komponenten einer Transformationsmatrix $A_{i,j}$ nach Gleichung (3) möglich.

Das Unterprogramm "VMULT" ist ein Spezialfall der Multiplikation zweier Matrizen, die Multiplikation einer Matrix mit einem Vektor. Damit ist die Position eines Punktes $P_{i,i}$ in einem Koordinatensystem j nach Gleichung (4) berechenbar.

Das Unterprogramm "INVERS" berechnet die zu einer 4*4- Matrix $A_{i,j}$ gehörende inverse Matrix $A_{i,j}^{-1}$ nach der Beziehung

$$A_{i,j}^{-1} = 1 / \det(A_{i,j}) * Ad_A \quad (26)$$

wobei Ad_A die transponierte Matrix der Adjunkten von $A_{i,j}$ darstellt.

Die ausführliche Beschreibung der Programme ist /25/ zu entnehmen.

Zur Modellierung der Koordinatentransformation auf dem Mikrorechner wurden darüberhinaus die Programme "BOHRWA" für den SB 2/1 und "SB 2/2" für den SB 2/2 geschaffen, die sowohl die Transformation von Gelenk- in kartesische Koordinaten (Hintransformation) als auch die Transformation von kartesischen in Gelenkkordinaten (Rücktransformation) erlauben. Die Grundlagen zur Koordinatentransformation wurden /21/ /29/ /30/ /31/

/32/ und /33/ entnommen.

Im Programm "BOHRWA" wurde die Biegung durch Festlegung von $\alpha = \gamma = 0^\circ$ nicht berücksichtigt. Die Teleskopausfahrlänge $s_{3,2}$ ist vor Berechnungsbeginn eingebbar. Die Lafettenausrichtung wurde parallel zur Bohrwagenlängsachse (x_0) als konstante Orientierung vorausgesetzt, wodurch sich in horizontaler und vertikaler Richtung folgende Bedingungen ergeben:

$$W = 360^\circ = \rho_{2,1} + \rho_{4,3} \quad (27)$$

$$W = 450^\circ = \rho_{1,0} + \rho_{5,4} \quad (28)$$

Da für die Lafettenpositionierung lediglich die Lage der Lafettenspitze von Interesse ist, wird bei der Hintransformation der Ort der Lafettenspitze aus den Gelenkkoordinaten durch Umsetzung der Gleichung (4) im Koordinatensystem 0 berechnet. Für die Rücktransformation wird die Methode der inversen Jacobi-Matrix verwendet /17/ /34/. Dabei läßt sich die augenblickliche Lage eines Punktes $P_{i,j}$ bei der Positionierung allgemein durch die nichtlineare Gleichung

$$P_{i,j}(t) = A_{i,j}(q_n(t)) \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, i \quad (29)$$

angeben.

Gesucht ist damit der Zusammenhang

$$q_n = A^{-1}_{i,j}(P_{i,j}(t)) \quad (30)$$

zur Berechnung der Gelenkkoordinaten. Die differentielle Betrachtungsweise, durch die Gleichung (30) linearisiert wird, führt zur Lösung.

Mit Einführung der Jacobi-Matrix

$$J(q_n) = A_{i,j} / q_n, \quad (31)$$

die aus der Transformationsmatrix $A_{i,j}$ durch Differentiation nach den einzelnen Gelenkkoordinaten in allgemeiner Form zu

ermitteln ist, läßt sich Gleichung (29) in der Form

$$\begin{aligned} d P_{i,j} &= A_{i,j} / q_n * d q_n \quad \text{bzw.} \\ d P_{i,j} &= J(q_n) * d q_n \end{aligned} \quad (32)$$

schreiben.

Sind die Funktionen $P_{i,j}(t)$ und $q_n(t)$ stetig und differenzierbar, ist die Lösung mit

$$d q_n = J^{-1}(q_n) * d P_{i,j} \quad (33)$$

angebar.

Vom Programm werden die Gelenkkoordinaten aus der eingegebenen Lafettenspitzenzielposition unter Berücksichtigung der Startposition mit wählbarer Genauigkeit und ggf. mit Zwischenpositionen iterativ berechnet, wobei die Iterationsschleife (Positionskontrolle durch Hintransformation und Vergleich) bis zum Erreichen der gewünschten Genauigkeit durchlaufen wird. Dabei wird das Verlassen des Arbeitsraumes nach Tabelle 1 automatisch erkannt und angezeigt.

Das Programm "SB 2/2" ist im Aufbau mit dem von "BOHRWA" identisch, führt aber die Hin- und Rücktransformation unter Berücksichtigung der Lafettendurchbiegung nach Abschnitt 2.2.2. aus. Zur Einstellung beliebiger Lafettenorientierungen ist die Eingabe der horizontalen (WH) und vertikalen (WV) Winkelsumme mit

$$WV = \rho_{2,1} + \rho_{5,4} - \alpha \quad (34)$$

$$WH = \rho_{1,0} + \rho_{6,5} \quad (35)$$

als Umsetzung der Parallellitätsbedingung möglich, wobei der Tangentenwinkel α mit den Gleichungen (5) bis (8) unter der Bedingung

$$\overline{AO}_7 = s_{7,6} - 1,580 \text{ m} \quad (\text{siehe Abbildung 5}) \quad (36)$$

automatisch berechnet wird.

$s_{3,2}$ ist vor der Berechnung eingebbar. Das Verlassen des Arbeitsraumes wird mit den Bedingungen nach Tabelle 3 kontrolliert.

Die bisher aufgeführten Programme sind nicht zur Auswertung umfangreicher Meßwertreihen konzipiert. Außerdem ist eine direkte Übernahme von Meßwerten in den Großrechner nicht möglich. Deshalb wurden die Mikrorechnerprogramme "MULTI" und "MULTINEU" geschaffen, die die Berechnung der Position der Meßpunkte (siehe Abschnitt 3) im Bezugskoordinatensystem 0 aus den gemessenen Gelenkstellungen realisieren. Dabei wird mit "MULTI" je nach Programmvariante die Berechnung für den SB 2/1 oder den SB 2/2 ohne Berücksichtigung weiterer Einflüsse ausgeführt. Mit "MULTINEU" erfolgt die Berechnung für den SB 2/2 unter Berücksichtigung von Bohrarm- und Lafettendurchbiegung nach Abschnitt 2.2.2.

2.3.3. Modell zur Momentberechnung bezüglich der Drehachsen

Zur Berechnung des Momentes um eine Drehachse ist außer der Massenberechnung, die durch Addition aller bezüglich der Drehachse wirksamen Massen erfolgt, die Ermittlung des dazugehörigen Ersatzschwerpunktes erforderlich. In "DIMAN" wird dies durch das Unterprogramm "SCHWER" durchgeführt.

Eingabegrößen

$s_{i,n}$	Schwerpunktkoordinaten des Massepunktes i im Koordinatensystem n
m_i	Masse des Massepunktes i
$s_{j,n}$	Schwerpunktkoordinaten des Massepunktes j im Koordinatensystem n
m_j	Masse des Massepunktes j

Ausgabegrößen

$s_{ers\ n,n}$	Koordinaten des Ersatzschwerpunktes n im Koordinatensystem n
----------------	--

Berechnungsgrundlagen

$$S_{\text{ers } n,n;x} = (x_1 * m_1 + x_2 * m_2) / (m_1 + m_2) \quad (37)$$

$$S_{\text{ers } n,n;y} = (y_1 * m_1 + y_2 * m_2) / (m_1 + m_2) \quad (38)$$

$$S_{\text{ers } n,n;z} = (z_1 * m_1 + z_2 * m_2) / (m_1 + m_2) \quad (39)$$

$$S_{\text{ers } n,n} = \begin{pmatrix} 1 \\ S_{\text{ers } n,n;x} \\ S_{\text{ers } n,n;y} \\ S_{\text{ers } n,n;z} \end{pmatrix} \quad (40)$$

Voraussetzung zur Anwendung des Programmes ist, daß die Schwerpunktkoordinaten der Massepunkte in einem Koordinatensystem angegeben sind, was ggf. mit den in Abschnitt 2.3.2. vorgestellten Unterprogrammen "VMULT", "MMULT" und "TRANSF" zu realisieren ist.

Das Unterprogramm "HEBEL" im Simulationssystem "DIMAN" realisiert die Berechnung des Drehmomentes um die z_i -Achse eines Koordinatensystems i , das durch Wirkung der Erdanziehungskraft auf den dazugehörigen Schwerpunkt entsteht. Die Modellierung ist in Abbildung 7 dargestellt.

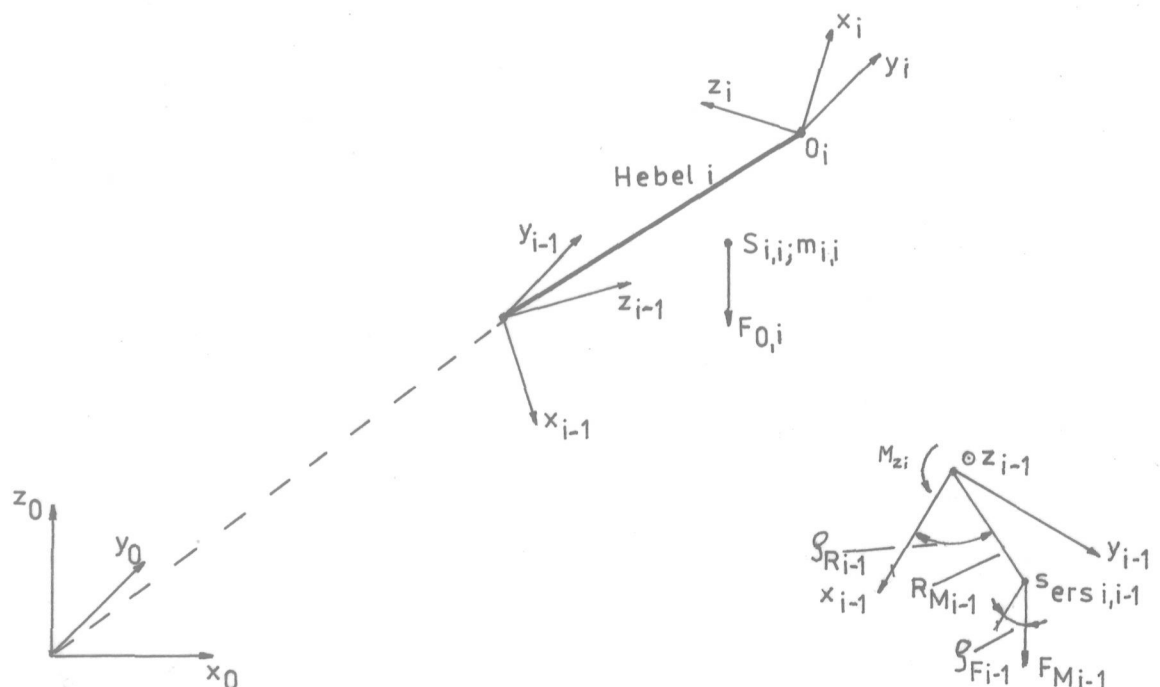


Abbildung 7: Modell zur Momentberechnung

Eingabegrößen

$S_{ers\ i,i}$	Schwerpunktkoordinaten des Ersatzschwerpunktes aller Hebel $i, i+1, i+2$ im Koordinatensystem i
$m_{i,i}$	Gesamtmasse aller Hebel $i, i+1,$
$A_{i,i-1}$	Transformationsmatrix nach Abschnitt 2.2.1.
$A_{i-1,0}$	Transformationsmatrix nach Abschnitt 2.2.1.

Ausgabegrößen

$M_z\ i-1$	Drehmoment durch Massewirkung um Achse z_{i-1}
$S_{ers\ i,i-1}$	Schwerpunktkoordinate des Ersatzschwerpunktes $S_{ers\ i,i}$ im Koordinatensystem $i-1$

Berechnungsgrundlagen

Schwerkraftkomponente der Masse $m_{i,i}$ im Koordinatensystem 0

$$F_{0,i} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -m_{i,i} * g \end{pmatrix} \quad (41)$$

Komponenten von $F_{0,i}$ im Koordinatensystem $i-1$

$$F_{i,i-1} = A^{-1}_{i-1,0} * F_{0,i} = \begin{pmatrix} 0 \\ F_{i,i-1;x} \\ F_{i,i-1;y} \\ F_{i,i-1;z} \end{pmatrix} \quad (42)$$

Momenterzeugende Kraft

$$F_{Mi-1} = \sqrt{F_{i,i-1;x}^2 + F_{i,i-1;y}^2} \quad (43)$$

Schwerpunktkoordinaten $S_{ersi,i-1}$ des Ersatzschwerpunktes $S_{ersi,i}$ im Koordinatensystem $i-1$

$$S_{ersi,i-1} = A_{i,i-1} * S_{ersi,i} = \begin{pmatrix} 1 \\ S_{ersi,i-1;x} \\ S_{ersi,i-1;y} \\ S_{ersi,i-1;z} \end{pmatrix} \quad (44)$$

wirksamer Hebel

$$R_{Mi-1} = \sqrt{S_{ersi,i-1;x}^2 + S_{ersi,i-1;y}^2} \quad (45)$$

Winkel der Kraft

$$\begin{aligned} \varphi_{Fi-1} &= \arctan(F_{i,i-1;y}/F_{i,i-1;x}) \\ \text{mit } \varphi_{Fi-1} &= P_i/2 \quad \text{für } F_{0,i-1;x} = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

Winkel des Hebels

$$\begin{aligned} \varphi_{Ri-1} &= \arctan(S_{ersi,i-1;y}/S_{ersi,i-1;x}) \\ \text{mit } \varphi_{Ri-1} &= P_i/2 \quad \text{für } S_{ersi,i-1;x} = 0 \end{aligned} \quad (47)$$

Moment um die Gelenkachse z_{i-1}

$$\begin{aligned} M_{Zi-1} &= F_{Mi-1} * R_{Mi-1} * \sin(\varphi_{Ri-1} - \varphi_{Fi-1}) \\ &\text{positiv in Richtung } z_{i-1} \end{aligned} \quad (48)$$

Programintern werden die Unterprogramme "INVERS" zur Berechnung der Matrix $A_{i-1,0}^{-1}$ und "VMULT" (siehe Abschnitt 2.3.2.) verwendet.

2.3.4. Modell zur Kraftberechnung für Arbeitszylinder

Das in "DIMAN" verfügbare Unterprogramm "KOKRA" berechnet die Kraft auf einen Arbeitszylinder aus den Positionen der Anlenkpunkte und dem Drehmoment um die Gelenkachse. Die Modellierung ist in Abbildung 8 dargestellt.

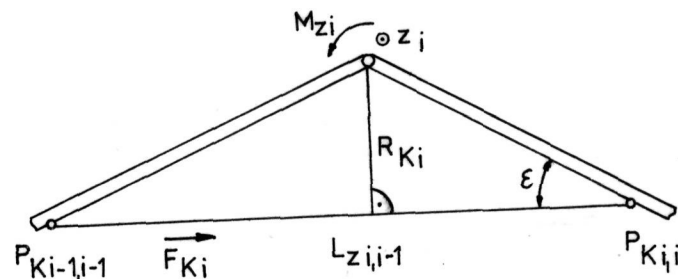


Abbildung 8: Modell zur Kolbenkraftberechnung

Eingabegrößen

$A_{i,i-1}$	Transformationsmatrix nach Abschnitt 2.2.1.
$P_{Ki-1,i-1}; P_{Ki,i}$	Anlenkpunkte des Hydraulikzylinders in den Koordinatensystemen i bzw. $i-1$
M_{zi}	Drehmoment um die Achse z_i

Ausgabegrößen

R_{Ki}	wirksamer Hebel
F_{Ki}	Kolbenkraft

Berechnungsgrundlagen

Projektion des Hebels $P_{Ki-1,i-1}$ in der $x_{i-1} - y_{i-1}$ -Ebene

$$P_{Ki-1,i-1} = \sqrt{P_{Ki-1,i-1;x}^2 + P_{Ki-1,i-1;y}^2} \quad (49)$$

Anlenkpunkt $P_{Ki,i}$ im Koordinatensystem $i-1$

$$P_{Ki,i-1} = A_{i,i-1} * P_{Ki,i} \quad (50)$$

Projektion des Hebels $P_{Ki,i-1}$ in der $x_{i-1} - y_{i-1}$ -Ebene

$$P_{Ki,i-1} = \sqrt{P_{Ki,i-1;x}^2 + P_{Ki,i-1;y}^2} \quad (51)$$

Zylinderausfahrlänge

$$L_{Zij-1} = \sqrt{(P_{Ki-1,i-1;x} - P_{Ki,i-1;x})^2 + (P_{Ki-1,i-1;y} - P_{Ki,i-1;y})^2} \quad (52)$$

Anlenkwinkel im Punkt $P_{Ki,i}$

$$\varepsilon_i = \arccos \left(\frac{(P_{Ki,i-1}^2 + L_{Zij-1}^2 - P_{Ki-1,i-1}^2)}{(2 * P_{Ki,i-1} * L_{Zij-1})} \right) \quad (53)$$

wirksamer Hebel

$$R_{Ki} = P_{Ki,i-1} * \sin \varepsilon_i \quad (54)$$

Kolbenkraft

$$F_{Ki} = M_{zi} / R_{Ki} \quad \text{mit } F_K = 0 \quad \text{für } R_{Ki} = 0 \quad (55)$$

Programmintern wird das Unterprogramm "VMULT" (siehe Abschnitt 2.3.2.) mit verwendet.

2.3.5. Modell für Proportionalwegeventile

Die erstellten Unterprogramme beruhen auf den Untersuchungen in /35/ /36/ /37/ /38/ /39/ und /40/ und sind in /26/ einschließlich der Berechnungsgrundlagen ausführlich beschrieben. Auf Grund des Einsatzes von Proportionalstromregelventilen war die Verwendung dieser Programme zur Modellierung nicht erfor-

derlich, sie seien aber der Vollständigkeit halber an dieser Stelle erwähnt.

Folgende Unterprogramme sind verfügbar:

- "KURZS" Berechnung der Kurzschlußkennlinien von Servo- und Proportionalwegeventilen
- "LEERL" Berechnung der Leerlaufkennlinie von Servo- und Proportionalwegeventilen
- "STAKE" Berechnung der Stützpunkttupel der statischen Kennlinien $P = f(s_y)$ und $Q = g(s_y)$ von elektrohydraulischen Wandlern bei äußerer Belastung

2.3.6. Modell für die gesteuerte Parallelführung

Für die Bewegungsplanung wurden die Erkenntnisse in /41/ /42/ und /43/ umgesetzt. Die Ansteuerfunktion Roboter wurde /44/ entnommen.

Das Modell realisiert die Berechnung von Ansteuerfunktionen für die Hydraulikantriebe des SB 2/2 unter der Bedingung der Lafettenparallelführung unter Beachtung des Einflusses der Biegung nach Abschnitt 2.2.2. für eine Vertikalbewegung der Lafette. Der verwendete Mikrorechner erlaubt auf Grund seiner Rechengeschwindigkeit keine Berechnung in Echtzeit, weshalb sie im "Offline"-Betrieb mit anschließender Abspeicherung auf Diskette durchgeführt wird. Ausgangspunkt ist eine anzustrebende Sollbeschleunigungs-Zeit-Funktion $a_{2,1}(t)$ für den Antrieb 2,1, aus der die Geschwindigkeits- und Weg-Zeit-Funktion $v_{2,1}(t)$ bzw. $L_{Z2,1}(t)$ durch Integration berechnet werden. Auf Grund der digitalen Ansteuerung erfolgt eine Zeitdiskretisierung der genannten Funktionen entsprechend der Anzahl der vorgesehenen Tastwerte. Aus der Differenz zweier aufeinanderfolgender Werte $L_{Z2,1}$ sowie der Tastzeit ist der notwendige Ölstrom $Q_{2,1}(t)$ bestimmbar und über die Approximation der Steuerspannungs-Ölstrom-Kennlinie des Antriebs wird die notwendige Steuerspannung ermittelt, die dann die Ansteuerzeitfunktion des Antriebes 2,1 darstellt. Für den Antrieb

5,4 werden aus $L_{Z2,1}(t)$ über $f_{2,1}(t)$ und die Parallelitätsbedingung die Werte für $f_{5,4}(t)$ und $L_{Z5,4}(t)$ ermittelt, aus denen analog zum Antrieb 2,1 die Ansteuerzeitfunktion des Antriebs 5,4 berechnet wird.

Als Sollbeschleunigungs- Zeit- Funktionen stehen

- Rechteck
- Dreieck
- Sinus
- Sinoide
- Roboter

zur Verfügung, deren Berechnungsgrundlagen nachfolgend erläutert werden.

Die Berechnung der Sollbeschleunigungs- Zeit- Funktionen, die in Abbildung 9 graphisch dargestellt sind, erfolgt nach den Gleichungen der Tabellen 5 und 6, die /45/ entnommen wurden.

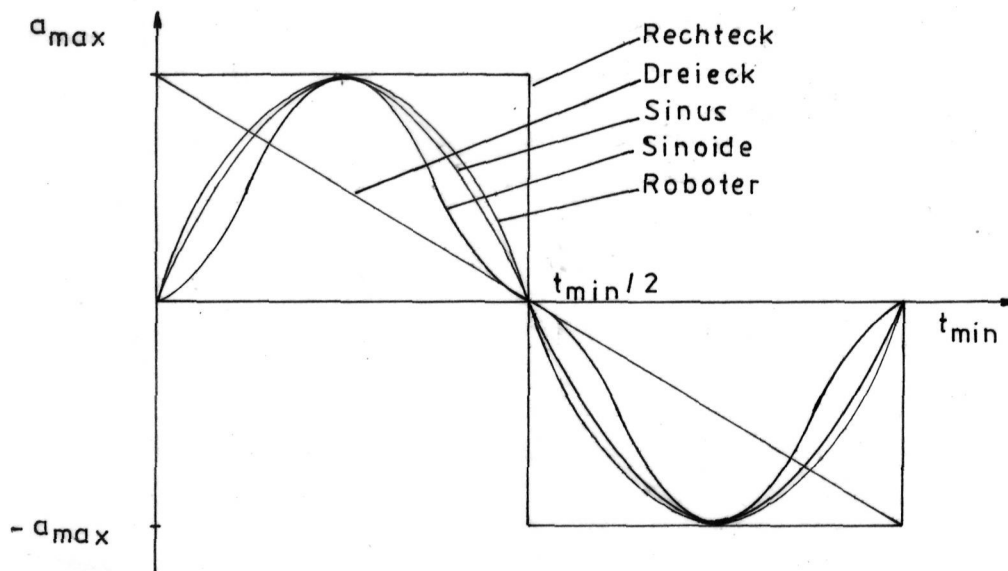


Abbildung 9: Darstellung der Sollbeschleunigungs-
Zeit- Funktionen

Tabelle 5: Sollbeschleunigungs- Zeit- Funktionen

Funktion	$0 - t - t_{\min}/2$	$t_{\min}/2 - t - t_{\min}$
Rechteck	$a(t) = a_{\max}$	$a(t) = -a_{\max}$
Dreieck	$a(t) = a_{\max} (1 - 2*t/t_{\min})$	$a(t) = a_{\max} (1 - 2*t/t_{\min})$
Sinus	$a(t) = a_{\max} * \sin(2*Pi*t/t_{\min})$	$a(t) = a_{\max} * \sin(2*Pi*t/t_{\min})$
Sinoide	$a(t) = a_{\max}/2 * (1 + \sin(3*Pi/2 + 4*Pi*t/t_{\min}))$	$a(t) = -a_{\max}/2 * (1 + \sin(3*Pi/2 + 4*Pi*t/t_{\min}))$
Roboter	$a(t) = 4 * a_{\max} * (2*t/t_{\min} - 4*t^2/t_{\min}^2)$	$a(t) = -4 * a_{\max} * (2*(t-t_{\min}/2)/t_{\min} - 4*(t-t_{\min}/2)^2/t_{\min}^2)$

Die Größen a_{\max} und v_{\max} werden mit den Gleichungen

$$a_{\max} = (p * A_K - F_{K\max}) / m \quad (56)$$

$$v_{\max} = \text{Min}(Q_P, Q_V) / A_K \quad (57)$$

berechnet, wobei m die vom Antrieb zu bewegendende Gesamtmasse darstellt. In Tabelle 7 sind die ermittelten Maximalwerte nach /45/ zusammengestellt, die der Modellierung zugrunde liegen.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Grenzwerte

Funktion	Grenzwerte
Rechteck	$a_{\max} = 4 * L_{Zi,i-1} / t_{\min}^2$ $v_{\max} = a_{\max} * t_{\min} / 2$ $t_{\min} = 2 * L_{Zi,i-1} / v_{\max}$
Dreieck	$a_{\max} = 6 * L_{Zi,i-1} / t_{\min}^2$ $v_{\max} = a_{\max} * t_{\min} / 4$ $t_{\min} = 3 * L_{Zi,i-1} / (2 * v_{\max})$
Sinus	$a_{\max} = 2 * L_{Zi,i-1} * \pi / t_{\min}^2$ $v_{\max} = a_{\max} * t_{\min} / \pi$ $t_{\min} = 2 * L_{Zi,i-1} / v_{\max}$
Sinoide	$a_{\max} = 8 * L_{Zi,i-1} / t_{\min}^2$ $v_{\max} = a_{\max} * t_{\min} / 4$ $t_{\min} = 2 * L_{Zi,i-1} / v_{\max}$
Roboter	$a_{\max} = 6 * L_{Zi,i-1} / t_{\min}^2$ $v_{\max} = a_{\max} * t_{\min} / 3$ $t_{\min} = 3 * L_{Zi,i-1} / v_{\max}$

Tabelle 7: Zusammenstellung von Maximalwerten

Richtung		ausfahren	einfahren	ausfahren	einfahren
<hr/>					
Antrieb		2,1	2,1	5,4	5,4
<hr/>					
A_K	(mm ²)	12272	7245	9503	7540
p	(MPa)	16	16	16	16
m	(kg)	2000	2000	800	800
Q_P	(l/min)	40	40	18	18
Q_V	(l/min)	37.2	37.2	23.5	23.5
F_{Kmax}	(N)	65000	65000	100000	100000
a_{max}	(m/s ²)	65.7	25.2	65.1	25.8
v_{max}	(m/s)	0.050	0.085	0.031	0.040

Die Approximation der Steuerspannungs- Ölstrom- Kennlinie nach /46/ S. 9 Bild 10 erfolgt mit

$$s_y/s_{ymax} = 0.096797791 + 0.059276285 \cdot Q_{2,1} - 0.0022141734 \cdot Q_{2,1}^2 + 0.000034748034 \cdot Q_{2,1}^3 \quad (58)$$

für den Bohrarm (steile Kennlinie) und mit

$$s_y/s_{ymax} = 0.11059464 + 0.10604462 \cdot Q_{5,4} - 0.0070224197 \cdot Q_{5,4}^2 + 0.00017700297 \cdot Q_{5,4}^3 \quad (59)$$

für die Lafette (flache Kennlinie).

Die daraus resultierende Steuerspannung, die an die Proportionalventilelektronik ausgegeben werden muß, wird unter Berücksichtigung der zu jedem Ventil gehörenden TK0- Prüfprotokolle nach

$$U_{i,i-1} = 6.5 \cdot s_y/s_{ymax} \quad (60)$$

für die Antriebe 2,1 und 5,4 für jeden Tastwert berechnet.

Als Parallelitätsbedingung wurden die Gleichungen (24) und (25) verwendet, wobei die Durchbiegungswinkel gemäß Abschnitt

2.2.2. mit den Bedingungen

$$\overline{AO_7} = s_{7,6} - 1.58 \text{ m} \quad (61)$$

$$\alpha = \arctan (0.000118 * (s_{7,6} - 1.58 \text{ m})^3) \quad (62)$$

für die Lafette und

$$\overline{BO_3} = s_{3,2} - 1.465 \text{ m} \quad (63)$$

$$r = (0.000091 * s_{7,6} + 0.00078) * s_{3,2} * (-\sin \varphi_{2,1}) \quad (64)$$

für den Bohrarm berücksichtigt werden.

Die programmtechnische Umsetzung erfolgt durch "VERT12", das ausführlich in /45/ beschrieben ist.

2.3.7. Modell für die geregelte Parallelführung

Das Modell realisiert die automatische Parallelführung der Lafette in vertikaler Richtung durch Regelung des Lafettenantriebs in Abhängigkeit des Bohrantriebes unter Berücksichtigung der Lafettenbiegung nach Abschnitt 2.2.2. Die programmtechnische Umsetzung erfolgt in 2 Programmen, die in /45/ ausführlich beschrieben sind:

1. Das Programm "HANDPOS" ermöglicht die Positionierung der Lafette durch Ansteuerung des Bohrarmhubantriebes von Hand über das Bedienpult und die geregelte Nachführung des Lafettenantriebes unter Berücksichtigung der Parallelitätsbedingung
2. Das Programm "REGPOS" realisiert die automatische Lafettenpositionierung aus einer Startposition in eine Zielposition mit Regelung der Parallelität während der Bewegung und in der Endposition

Zur Verkürzung der Programmlaufzeiten wurde der Einfluß der Bohrarmdurchbiegung mit der Bedingung konstanter Ausfahrlänge als konstant vorausgesetzt. Somit wird die Parallelitätsbedingung, die als Regelkriterium verwendet wird, mit den Gleichungen (37) und (38) dargestellt.

Die Regelabläufe der beiden Programme sind in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

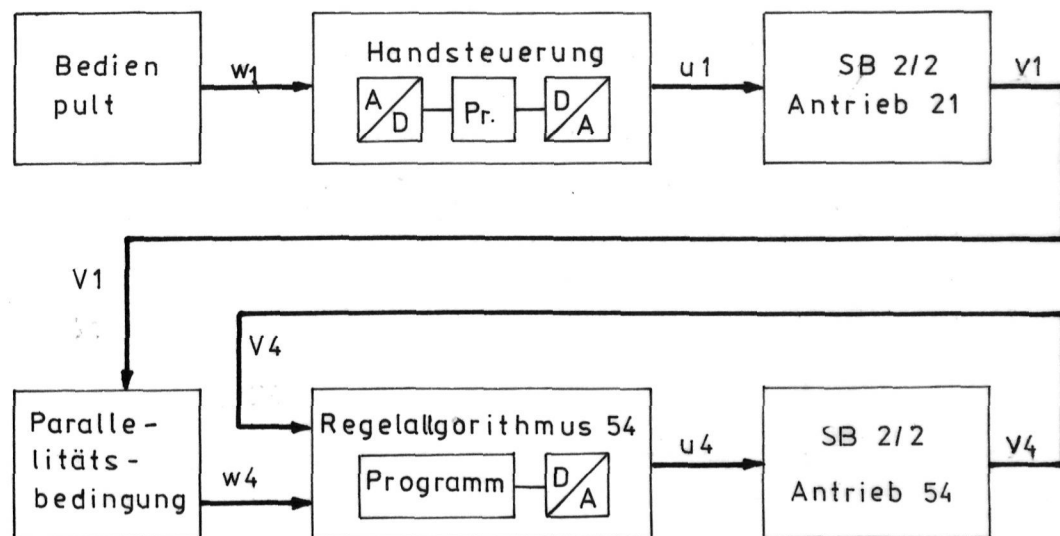


Abbildung 10: Regelablauf bei "HANDPOS"

Die mit dem Hebel "Bohrarm heben" des abgesetzten Bedienpultes erzeugte Steuerspannung wird über A- D- und D- A- Wandler der Proportionalventilelektronik des Antriebes 2,1 als Stellgröße u_1 zugeführt. Dies führt mit den Proportionalstromregelventilen zu einem Ölstrom, der eine Veränderung der Gelenkstellung ($\varphi_{2,1}$) bewirkt. Der Istwert v_1 der Gelenkstellung wird mit einem Sensor erfaßt und mit Hilfe der Parallelitätsbedingung wird daraus der Sollwert w_4 des Gelenkes $\varphi_{5,4}$ berechnet, der als eine Eingangsgröße für den Regelalgorithmus dient. Der ebenfalls mit einem Sensor erfaßte Istwert v_4 des Antriebs ist die zweite Eingangsgröße des Reglers. Damit wird die Stellgröße u_4 für den Antrieb 5,4 berechnet, die über D- A- Wandler an die Proportionalventilelektronik des Antriebes ausgegeben wird.

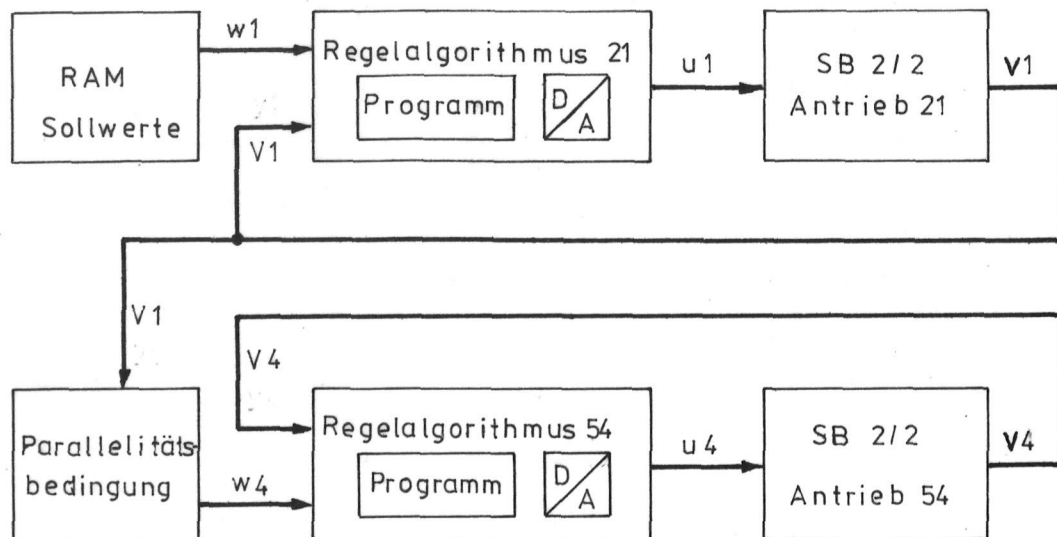


Abbildung 11: Regelablauf bei "REGPOS"

Ausgangspunkt ist eine Bezugsstellung, die mit den Sensor erfaßt wird. Mit diesen Meßwerten werden die Werte w_1 und w_4 der Parallelitätsbedingung mit den Gleichungen (37) und (38) berechnet, die als Regelungskriterium verwendet werden. Nach Eingabe der Zielposition (Winkel $\varphi_{2,1}$) wird für den Antrieb 2,1 eine Sollwertansteuerfunktion mit Hilfe der Funktion Roboter (siehe Abschnitt 2.3.6.) berechnet und im RAM des Mikrorechners abgelegt, was auf Grund der Rechengeschwindigkeit im "Offline"-Betrieb vorgenommen wird. Diese dienen als Sollwerte w_1 des Reglers für den Antrieb 2,1, der als Istwert v_1 die mit einem Sensor erfaßte Gelenkstellung ($\varphi_{2,1}$) verwendet. Der Regler berechnet damit die Stellgröße u_1 , die über D-A-Wandler und Elektronik dem Antrieb 2,1 zugeführt wird. Aus dem Istwert v_1 wird mit der Parallelitätsbedingung der Sollwert w_4 für die Gelenkstellung von $\varphi_{5,4}$ berechnet. Analog zum Programm "HANDPOS" erfolgt dann die Regelung des Antriebes 5,4.

Der von beiden Programmen zur Regelung verwendete Algorithmus ist ein digitaler PID-Regler, der in Anlehnung an /47/ programmiert wurde.

Aus der Stellgrößenberechnung für einen Analogregler

$$u(t) = K * (e(t) + 1/T_I * \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D * de(t)/dt) \quad (65)$$

folgt für den digitalen Regler mit der Zeitdiskretisierung in Abtastintervallen T_0

$$u_k = u_{k-1} + g_0 * e_k + g_1 * e_{k-1} + g_2 * e_{k-2}, \quad (66)$$

wobei

$$u_k = u(k * T_0) \quad (67)$$

$$g_0 = K * (1 + T_D / T_0) \quad (68)$$

$$g_1 = K * (T_0 / T_I - 1 - 2 * T_D / T_0) \quad (69)$$

$$g_2 = K * (T_D / T_0) \quad (70)$$

gilt. Folgende Bedingungen sind für die Reglerparameter einzuhalten

$$g_0 > 0 \quad (71)$$

$$|g_1| > g_0, \quad g_1 < 0 \quad (72)$$

$$|g_0 + g_1| < g_2 < g_0. \quad (73)$$

Daraus ergibt sich die in Abbildung 12 dargestellte Übertragungsfunktion des PID- Reglers

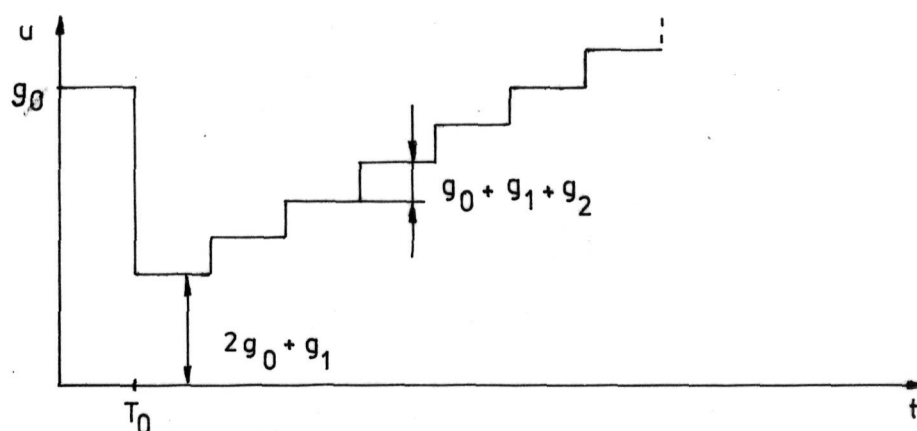


Abbildung 12: Übertragungsfunktion eines digitalen PID- Reglers

T_0 wurde unter Berücksichtigung der in /46/ und /48/ angegebenen Schaltzeiten der Hydraulikventile in den Unterprogrammen "REGEL54" mit 25 ms und in "REGEL541" mit 10 ms festgelegt. Die Regelabweichungen betragen in "REGEL45" $\pm 0.15^\circ$ und in "REGEL541" $\pm 0.08^\circ$.

2.4. Bewertung der geschaffenen Modelle

Zur Bewertung der Modelle dient der Vergleich zwischen den Berechnungen und den durchgeführten Messungen am realen Objekt entsprechend Abschnitt 3.

Für die Modelle zur Koordinatentransformation "MULTI", "SB 2/2" und "MULTINEU" wurde der Positionsvergleich der Meßpunkte im Bezugskoordinatensystem 0 durchgeführt. Die größten Differenzen zu den mit einem Theodolitenmeßsystem ermittelten Werten traten erwartungsgemäß bei den mit dem Programm "MULTI" berechneten Werten auf, das durch starre Transformationsbeziehungen gekennzeichnet ist. Bereits die Berücksichtigung der Lafettendurchbiegung im Programm "SB 2/2" erbrachte einen deutlichen Genauigkeitsgewinn, der durch die Hinzunahme der Bohrarmdurchbiegung in "MULTINEU" noch vergrößert wurde. Die damit erreichte Genauigkeit der berechneten absoluten Endposition der Lafettenspitze im Bezugssystem als Ergebnis der Transformation über alle Koordinatensysteme ist bezüglich des Abstandes vom Koordinatenursprung besser als 98 %. Die Positionierung der Lafette erfolgt jedoch relativ zu einer eingenommenen Bezugsstellung, sodaß die erreichbare relative Positioniergenauigkeit innerhalb eines Bohrschemas größer ist und der angegebene Fehler von 2 % einen konstanten Betrag der absoluten Position darstellt. Da außerdem der Einfluß des Meßfehlers des Theodolitenmeßsystems sowie Gelenkspiel und Torsionen noch nicht berücksichtigt sind, wurde diese Genauigkeit für die weiteren Betrachtungen als ausreichend erachtet. Die größten absoluten Abweichungen am SB 2/2 betrugen für die Lafettenspitze im Bezugskoordinatensystem

$$\Delta x_{7,0} = 74 \text{ mm}; \quad \Delta y_{7,0} = 211 \text{ mm}; \quad \Delta z_{7,0} = 168 \text{ mm}.$$

Das Modell zur Kraftberechnung auf die Hydraulikzylinder (/49/) wurde durch Auswertung der mit den Druckmessern am SB 2/1 in jeder Gelenkstellung ermittelten Ein- und Ausgangsdrücke der Hydraulikzylinder überprüft. Es wurde ausschließlich auf den SB 2/1 und nur auf die Antriebe 2,1 und 5,4 angewendet. Die Abweichungen zu den Messungen betrugen maximal 2 % beim Antrieb 5,4, was als ausreichende Genauigkeit zu werten ist. Beim Antrieb 2,1 betrugen die Maximalabweichungen 20 %. Dies ist auf die im Modell nicht berücksichtigte Lageänderung der Schwerpunkte der Hydraulikschläuche und der der Antriebe bei Veränderung der Gelenkstellungen zurückzuführen. Auf Grund der Verwendung eines SB 2/2 für die weiteren Untersuchungen und der dort eingesetzten Proportionalstromregelventile war eine weitere Modellverbesserung nicht erforderlich.

Das Modell zur gesteuerten Parallelführung der Lafette wird durch Vergleich der erreichten Endpositionen mit den vom Modell verwendeten Sollendpositionen sowie durch Vergleich der Verläufe der Geberpositionen mit den vom Modell berechneten Sollverläufen bewertet. Im ersten Modell nach Abschnitt 2.3.6. wurden für die verschiedenen Ansteuerzeitfunktionen Sollbewegungen des Bohrarmes von $\varphi_{2,1} = 280^\circ$ zu $\varphi_{2,1} = 290^\circ$ bei einer Bewegungsdauer von 5.72 s und 400 Tastwerten zugrundegelegt und in Anlage A5 sind die Meßergebnisse für alle Ansteuerfunktionen dargestellt. Von beiden Antrieben wurde unabhängig von der gewählten Ansteuerfunktion etwa die Hälfte der vorgesehenen Bewegung ausgeführt. Die Auswertung dieser Messungen zeigt, daß die dem Modell zugrunde liegende, approximierte Steuerspannungs- Ölstrom- Kennlinie der Proportionalstromregelventile nach /46/ nicht erreicht wurde. Deshalb war eine Berechnung der tatsächlichen Ölströme aus den Gelenkstellungsverläufen erforderlich. Die damit ermittelten Approximationsfunktionen lauten für den Bohrarmantrieb

$$s_y/s_{y\max} = 0.088051265 + 0.1272882 \cdot Q_{2,1} - 0.012568003 \cdot Q_{2,1}^2 + 0.00047921399 \cdot Q_{2,1}^3 \quad (74)$$

und für den Lafettenantrieb

$$s_y/s_{y\max} = 0.055589802 + 0.34677253 \cdot Q_{5,4} - 0.11157338 \cdot Q_{5,4}^2 + 0.014934919 \cdot Q_{5,4}^3 \quad (75)$$

Die Maximalölströme Q_v der Ventile verringern sich für den Antrieb 2,1 von 37.2 auf 17.2 l/min und für den Antrieb 5,4 von 23.5 auf 5.3 l/min. Damit ist eine Erhöhung der Bewegungszeitdauer verbunden.

Für den Antrieb 2,1 ist die nahezu lastunabhängige Funktion der Proportionalstromregelventile nachweisbar und sowohl Endposition als auch zeitlicher Verlauf der Gelenkstellung stimmen gut mit der Modellierung überein. Bezüglich des Antriebes 5,4 konnten auf Grund der sich wegen der größeren Zeitdauer ergebenden geringeren Steuerspannung keine Verbesserungen bezüglich der Positioniergenauigkeit erzielt werden. Die verwendete Approximation wird auf Grund der großen Nullüberdeckung des Proportionalstromregelventils für kleine Steuerspannungen ungenauer. In zukünftigen Untersuchungen ist deshalb die Kennlinienapproximation besonders bei kleinen Ventilaussteuerungen ggf. durch Bereichsumschaltungen zu verbessern.

Die Modellierung der geregelten Parallelführung wird durch visuelle Beobachtungen und die erreichte Endposition bewertet. Diese Parallelführung erfüllte alle Anforderungen zur Positioniergenauigkeit entsprechend dem verwendeten Modell. Die erzielten Winkelabweichungen in der Endposition betrugen bei Verwendung der Unterprogramme "REGEL54" maximal 0.23° und mit "REGEL541" maximal 0.20° . Das Verhalten während der Positionierung ist stark von den verwendeten Reglerparametern abhängig und reicht von ruhiger, schneller Bewegung in die Zielposition bis zu unkontrollierbaren Schwingungen, die eine Positionierung unmöglich machen. Das Nachlaufen der Lafette während der Bewegung ist auf endliche Regelgeschwindigkeit und Regelabweichung zurückzuführen, aber kleiner als 1° .

3. Beschreibung der durchgeführten Messungen

=====

3.1. Messungen am Bohrwagen SB 2/1

3.1.1. Zielstellung der Messungen

Zur Realisierung der im Abschnitt 1.2. formulierten Gesamtaufgabe war es notwendig, am SB 2/1 Messungen zum statischen und zum dynamischen Verhalten durchzuführen. Die Messungen zum statischen Verhalten werden im weiteren kurz als statische Messungen und die zum dynamischen Verhalten als dynamische Messungen bezeichnet.

Die statischen Messungen dienen der Analyse des kinematischen Modells zur Koordinatentransformation und der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Gelenkstellungen auf die Arbeitspunkte der Hydraulikzylinder.

Die dynamischen Messungen dienen der Beurteilung des Schwingungsverhaltens des Bohrarmes infolge der digitalen Antriebsansteuerung und der Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der Antriebe.

3.1.2. Meßaufbau und Meßablauf

Meßaufbau der statischen Messungen

Der Meßaufbau ist in Anlage 7 - 3 dargestellt.

Als Meßobjekt dient ein SB 2/1 mit langer Lafette (7.25 m) der laufenden Produktion, an den zur Meßwerterfassung Sensoren angebracht wurden. Die Größen $p_{1,0}$, $p_{2,1}$, $p_{4,3}$ und $p_{5,4}$ werden mit inkrementalen Gebern (IGR; /50/) in den Gelenken erfaßt. Der Geber für das Gelenk 2,1 ist zur Reduzierung des Einflusses der Biegung am Fußpunkt des Bohrarmhubzylinders angeordnet und wird über ein Gestänge betätigt. Deshalb ist eine Umrechnung des Meßwertes $p'_{2,1}$ in den wirklichen Wert für $p_{2,1}$

nach Gleichung (76) erforderlich.

$$\varphi_{2,1} = \arcsin \left((0.3676 \cdot \sin \varphi'_{2,1} \cdot \cos \varphi'_{2,1}) + (0.588 \cdot \sin \varphi'_{2,1} \cdot 0.391 - 2.89 \cdot (\sin \varphi'_{2,1})^2) \right) \quad (76)$$

Zum Nachweis der Lafettenparallelität mit einer maximalen Abweichung von 1 cm/m ist der Einsatz hochauflösender Sensoren erforderlich. Zur Verdeutlichung der Berechnung der notwendigen Geberauflösung wird Abbildung 13 verwendet.

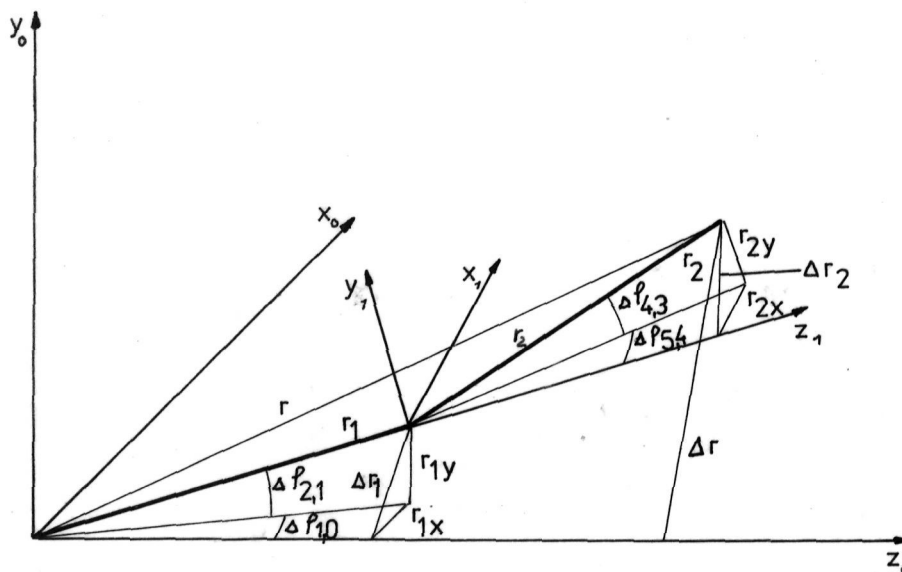


Abbildung 13: Zur notwendigen Geberauflösung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden in Abbildung 13 die Koordinatenursprünge O_0 und O_1 sowie O_3 und O_4 in jeweils einem Punkt zusammengefasst und die z_0 -Achse als wirkliche Richtung angenommen. Die Geberauflösungen werden durch die Winkel $\Delta \varphi_{1,0}$, $\Delta \varphi_{2,1}$, $\Delta \varphi_{4,3}$ und $\Delta \varphi_{5,4}$ ausgedrückt.

Die durch die begrenzten Gebergenauigkeiten nicht erfassbaren Richtungsabweichungen entstehen in den Gelenken 1,0, 2,1, 4,3 und 5,4. Die größte Abweichung Δr soll kleiner als 1 % sein. Damit ist

$$\Delta r / r = 0,001 \quad (77)$$

als Grenzwert festgelegt.

Die größte mögliche Abweichung ergibt sich für

$$\Delta p_{1,0} = \Delta p_{2,1} = \Delta p_{4,3} = \Delta p_{5,4} \quad (78)$$

Daraus folgt

$$\Delta r_1 / r_1 = \Delta r_2 / r_2 = 0.005 \quad (79)$$

und es gelten folgende Bedingungen

$$r_{1x} = r_{1y} \quad (80)$$

$$r_{2x} = r_{2y} \quad (81)$$

$$\Delta r_1 = \sqrt{2} * r_{1x} \quad (82)$$

$$\Delta r_2 = \sqrt{2} * r_{2x} \quad (83)$$

Somit ist die notwendige Geberauflösung bestimmbar mit

$$\begin{aligned} \sin \Delta p_{2,1} &= r_{1x} / r_1 = \Delta r_1 / (\sqrt{2} * r_1) \\ &= 0.005 / \sqrt{2} \end{aligned} \quad (84)$$

$$\Delta p_{2,1} = \arcsin (0.005 / \sqrt{2}) \quad (85)$$

Die erforderliche Geberauflösung ergibt sich zu

$$\Delta p_{2,1} = 3.54 * 10^{-3} \text{ rad} = 1777 \text{ Impulse/ Umdrehung.}$$

Die Auflösungen der verwendeten Meßgeber sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Auflösungen der Meßgeber

Winkel	Geber Nr.	Geberauflösung /Inkrement pro Umdr./
$p_{1,0}$	1	2500
$p_{2,1}$	2	2500
$p_{4,3}$	3	1024
$p_{5,4}$	4	1024

Auf Grund der hardwaremäßigen Impulsvervierfachung, die in Anlehnung an /51/ auf den Interfacekarten durchgeführt wird, ergibt sich eine Auflösung von mindestens 4096 Impulsen pro Umdrehung, was den geforderten Werten entspricht.

Die Größen $s_{3,2}$, $f_{6,5}$ und $s_{7,6}$ werden von Hand gemessen.

Die Parameter der Biegung nach Abschnitt 2.2.2. sind nach Auswertung der Messungen berechenbar.

Zur Erfassung des Neigungswinkels des Schwenklagerzapfens um y_0 sowie des Tragkonstruktionsdrehwinkels um z_7 wurden zwei inkrementale Geber (5 und 6) mit Auflösungen von 2500 bzw. 1024 Impulsen pro Umdrehung angebracht, die mit einem Pendelkörper die angegebenen Winkel bezüglich der Senkrechten messen. Die Ausschläge dieser Pendel werden bei den dynamischen Messungen zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens benutzt.

Am Bohrarmhubzylinder sowie am Lafettenkippzylinder sind jeweils zwei Druckmesser angebracht, die zur Untersuchung der Kraftwirkungen auf die Zylinder dienen.

Für die statischen Messungen wird zur Bestimmung der Lage angebrachter Meßpunkte ein Theodolitenmeßsystem verwendet. Dieses besteht aus zwei Theodoliten, die sich in einem festgelegten Abstand zueinander befinden und mit denen jeder Meßpunkt vermessen wird. Mit der Vermessung des jeweils anderen Theodolitenstandpunktes wird ein Koordinatensystem aufgebaut, in dem die Lagen der Meßpunkte mit der Methode des Vorwärtseinschneidens angebbare sind. Über die Bohrwagenfixpunkte erfolgt die Umrechnung in das Bohrwagenkoordinatensystem. Die Koordinaten der Meßpunkte in den zugehörigen Koordinatensystemen zeigt Tabelle 9.

Die Meßpunkte 1a, 3a und 3b sind bei Messungen mit seitlich geklappter Lafette ($f_{6,5} = 180^\circ$) erforderlich, weil die Punkte 1 bzw. 3 durch Anlagenteile verdeckt sind und damit eine Vermessung nicht möglich ist.

Tabelle 9: Koordinaten der Meßpunkte

Mp Nr.	Koord.- system i	x_i /mm/	y_i /mm/	z_i /mm/
1	7	57	- 18	- 137
1a	7	0	230	- 140
2	6	- 251	161	1852
3	6	- 251	161	- 828
3a	6	143	278	- 826
3b	6	143	- 131	- 828
4	3	132	- 166	86
5	2	- 196	78	1731
6	1	- 2	- 6	195
7	1	- 449	387	151
8	0	- 158	- 362	220
9	0	190	- 955	166
10	0	-3960	- 886	843

Während die von Hand gemessenen Größen in den Rechner eingegeben werden, erfolgt die Übernahme der Meßwerte der inkrementalen Geber automatisch durch CTC- Karten. Das Blockschaltbild einer CTC- Karte zeigt Anlage 7 - 4. Nach der Vierfachauswertung der vom Geber kommenden Impulse stehen diese getrennt für Vorwärts- und Rückwärtsdrehung zur Verfügung. Über ein Wickelfeld werden diese Impulse den CTC- Schaltkreisen zugeführt und deren Zählerstände stehen am K 1520- Bussystem zur Weiterverarbeitung bereit.

Meßablauf der statischen Messungen

Bei der Durchführung der statischen Messungen werden nach Einnahme der Grundstellung zur Gebernulpunktfixierung nacheinander die einzelnen Meßstellungen eingenommen und nach Beruhigung des Gesamtsystems die Vermessung der angeführten Punkte realisiert. Die Vorgabe der einzustellenden Gelenkkordinaten erfolgt nach einem vorher festgelegten System und

wird vom Programm auf dem Monitor angezeigt. Ebenso werden die Istkoordinaten der Gelenke angezeigt, sodaß ein direkter Vergleich möglich ist. Die Einstellung selbst erfolgt mit dem Bohrwagenbedienpult durch Betätigen der den Gelenkantrieben zugeordneten Taster.

In jeder Meßstellung werden die Druckwerte von den Manometern abgelesen und in den Rechner eingegeben. Gemeinsam mit den anderen Handeingabegrößen sowie den Werten der Winkelsensoren werden sie auf Diskette zur späteren Auswertung abgespeichert. Das Struktogramm des zur Messung verwendeten Programmes "STELLUNG" ist Anlage 5 - 1 zu entnehmen. Der Quelltext des in Turbo-Pascal (/52/) geschriebenen Programmes hat einen Umfang von 16 kbyte, das compilierte Programm ist 20 kbyte lang.

Meßaufbau und Meßablauf der dynamischen Messungen

Zur Durchführung der dynamischen Messungen wird der bei den statischen Messungen beschriebene Aufbau verwendet, jedoch ohne das Theodolitenmeßsystem.

Vom Bedienpult des Bohrwagens wird eine Antriebsbewegung durch Tastendruck ausgelöst und gleichzeitig wird das Unterprogramm "AUFNAHME" des Meßwerterfassungsprogramms "MESSUNG" durch Tastaturbetätigung gestartet, wobei die Synchronisation von Hand erfolgt. Während der Bewegung werden die IGR abgetastet und die Ergebnisse abgespeichert. Das Programm "MESSUNG", dessen Struktogramm in Anlage 5 - 2 dargestellt ist, realisiert eine Abtastung aller sechs IGR mit einer wählbaren Folgefrequenz, die bei allen Messungen mit 400 Hz festgelegt wurde. Bei abgetasteten 1023 Werten pro Geber entspricht das einer Gesamtzeit von ca. 2.5 s.

3.1.3. Auswertung und Ergebnisse

Eine umfassende Auswertung aller am SB 2/1 durchgeführten Messungen wurde in /10/ vorgenommen und ein erster Vergleich mit den Modellen erfolgte im Abschnitt 2.4.

Für die Bewertung des kinematischen Modells wurden insgesamt 81 verschiedene Gelenkstellungskombinationen analysiert. Bei allen wurden zunächst die Abweichungen zwischen den mit dem Programm "MULTI" berechneten und den gemessenen Positionswerten der einzelnen Meßpunkte im Bezugskoordinatensystem ermittelt, deren Maximalwerte in Tabelle 10 zusammengestellt sind.

Tabelle 10: Maximalabweichungen der Meßpunkte im
Bezugskoordinatensystem in mm

Meßpunkt	1	2	3	4	5	6	7
Δx_0	246	242	244	206	114	49	59
Δy_0	557	318	258	175	92	9	25
Δz_0	465	117	47	28	23	3	4

Als Hauptgründe für die Positionsabweichungen wurden die Durchbiegungen von Bohrrarm und Lafette ermittelt. Zur Quantifizierung dieses Einflusses sind relative Betrachtungen zwischen benachbarten Koordinatensystemen durchgeführt worden, die nachfolgend erläutert werden.

Für die Lafette wurde aus der Lage der Meßpunkte 2 und 3 der Tragkonstruktion die Position des Meßpunktes 1 der Lafettenspitze bei Annahme starrer Transformationsbeziehungen im Bezugskoordinatensystem berechnet. Der ermittelte Wert wurde mit dem Meßwert verglichen. Damit konnte nachgewiesen werden, daß für annähernd horizontale Lage der Lafette ihre Durchbiegung nur von der Ausfahrlänge abhängt und mit Abweichungen von höchstens 2 % durch die Gleichung (5) modellierbar ist. Den Verlauf der Lafettendurchbiegung in Abhängigkeit von der Ausfahrlänge sowie die aus den Meßwerten ermittelte Durchbiegung zeigt Abbildung 14.

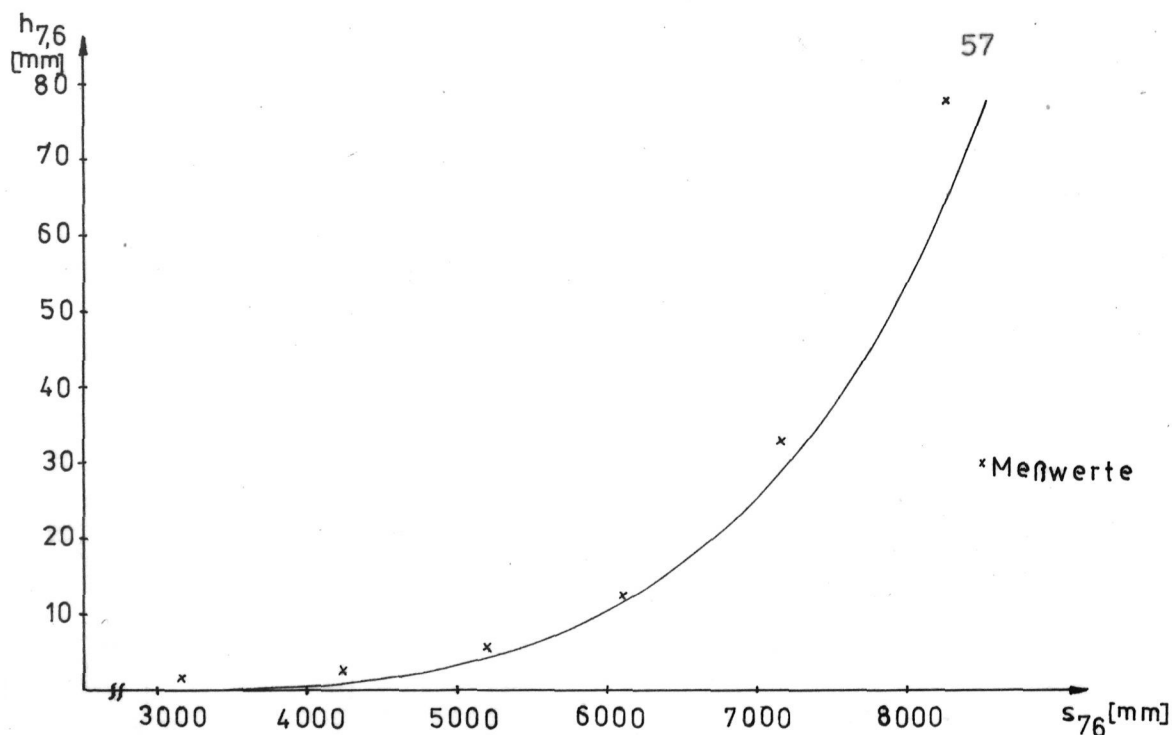


Abbildung 14: Durchbiegung der Lafette

Für den Bohrarm wurde ebenfalls unter Annahme starrer Transformationsbeziehungen die Lage des Meßpunktes 4 an der Teleskopspitze aus den Meßpunkten 5 und 6 des Bohrarmes im Bezugssystem berechnet und mit dem Meßwert verglichen. Damit konnte die Abhängigkeit der Durchbiegung insbesondere von den Größen $\varphi_{2,1}$, $s_{3,2}$ und $s_{7,6}$ nachgewiesen werden. Abbildung 15 zeigt die Bohrarmdurchbiegung in Abhängigkeit von der Teleskopausfahrlänge $s_{3,2}$ und der Lafettenausfahrlänge $s_{7,6}$ für horizontalen Bohrarm ($\varphi_{2,1} = 270^\circ$). Die mit den Gleichungen (9) bis (12) berechnete Durchbiegung dient als Vergleich.

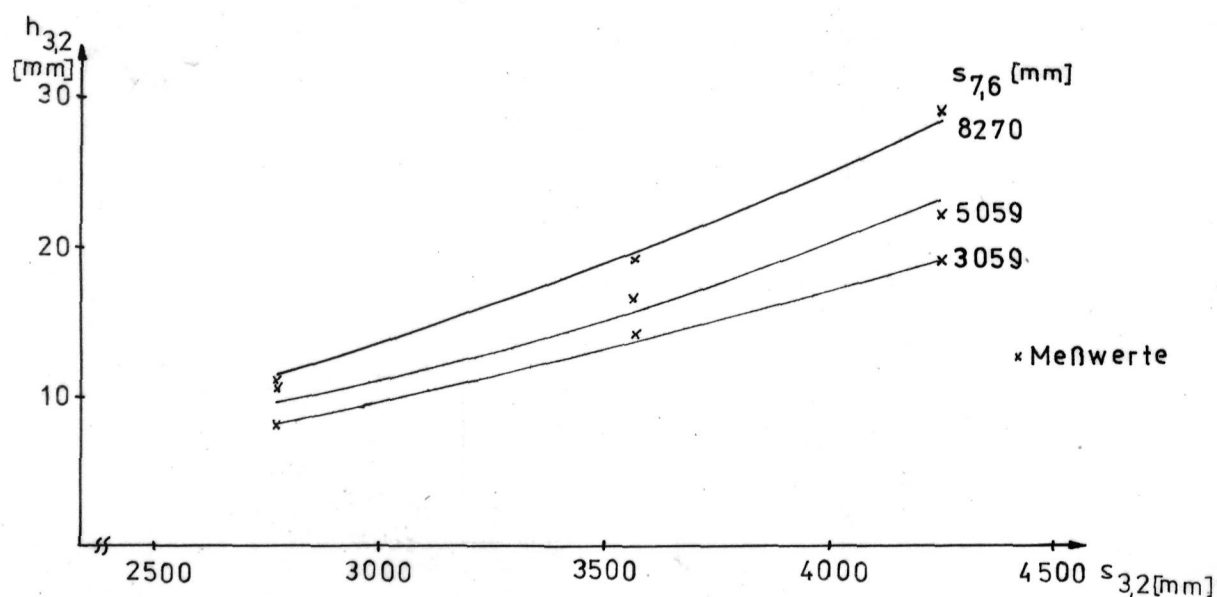


Abbildung 15: Durchbiegung des Bohrarmes

Aus den mit den Druckmessern ermittelten Werten wurden die Kräfte auf die beiden Antriebszylinder berechnet. Die Ablesegenauigkeit ist mit ± 0.1 MPa anzunehmen, wodurch Fehler der Kräfte von ca. 2 % entstehen. Die Kraft auf den Antrieb 4,3 ist insbesondere von $\varphi_{2,1}$ und $s_{7,6}$ abhängig, wogegen auf den Antrieb 2,1 alle Gelenkkoordinaten Einfluß haben.

Abbildung 16 zeigt die für den Antrieb 4,3 aus den Meßwerten ermittelten Kräfte für horizontalen ($\varphi_{2,1}=270^\circ$) und angehobenen Bohrarm ($\varphi_{2,1}=330^\circ$) in Abhängigkeit von der Lafettenausfahrlänge $s_{7,6}$. Zum Vergleich wurde der mit dem Modell ermittelte Zusammenhang eingezeichnet.

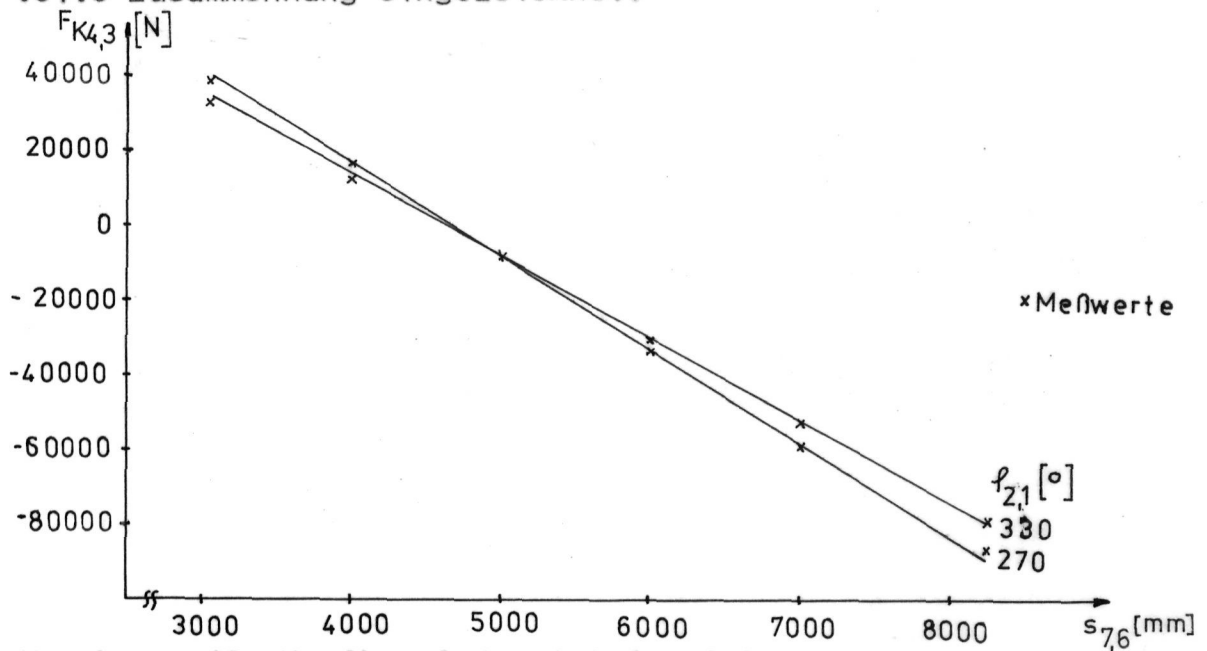


Abbildung 16: Kraft auf den Antrieb 4,3

Die bei den dynamischen Messungen aufgenommenen zeitlichen Verläufe aller Geberstellungen werden für verschiedene Bewegungen in Anlage 3 dargestellt. Entsprechend der Zielstellung der Untersuchungen, sich über das Schwingungsverhalten und die gegenseitige Beeinflussung der Antriebe zu informieren, ist aus ihnen zu ersehen, daß bei einem Anfahrvorgang des Bohrarmes bei ausgefahrenen Teleskop und Lafette in vertikaler Richtung sowohl bei gedämpfter als auch bei ungedämpfter Bewegung Schwingungen an den Pendeln auftreten (Anlage 3 - 1 und 3 - 2), die sich in der Amplitude (Verhältnis etwa 1:3) unterscheiden. Eine Beeinflussung anderer Antriebe ist nicht nachweisbar.

Auch bei einem horizontalen Anfahrvorgang des Bohrarmes unter gleichen Bedingungen (Anlage 3 - 3 und 3 - 4) treten bei beiden Pendelgebern Schwingungen auf, die sich ebenfalls für gedämpfte und ungedämpfte Ansteuerung in der Amplitude im Verhältnis 1:2 bzw. 1:4 unterscheiden. Die Beeinflussung des Bohrarmvertikalantriebes ist aus dem Verlauf von $\varphi_{2,1}$ zu erkennen.

Bei dem in Anlage 3 - 5 dargestellten Verlauf eines horizontalen Ausschwingvorganges des Bohrarmes ist deutlich die Einleitung von Schwingungen an den Meßkurven der Pendelgeber und am Verlauf von $\varphi_{2,1}$ zu erkennen. Die visuellen Beobachtungen ergaben eine Schwingung der Lafettenspitze um ca. 20 cm bei einer Zeitdauer bis zum Stillstand von ca. 40 s. Es zeigt sich, daß bei Beendigung eines Positioniervorganges in horizontaler Richtung Schwingungen in horizontaler und vertikaler Ebene eingeleitet werden.

3.2. Messungen am Bohrwagen SB 2/2

3.2.1. Zielstellung der Messungen

Am Bohrwagen SB 2/2 wurden ebenfalls statische und dynamische Messungen durchgeführt.

Die statischen Messungen sind identisch mit den am SB 2/1 durchgeführten und dienen ebenfalls der Ermittlung und Überprüfung von Einflußgrößen zur Positionierung, der Beurteilung des statischen Gesamtmodells sowie der Modellverbesserung.

Den Hauptteil bilden die dynamischen Messungen, die sich in drei Teiluntersuchungen gliedern.

Der erste Teil, bei dem die Vertikalantriebe von Bohrarm und Lafette mit Sollwertspannungssprüngen beaufschlagt werden, dient einerseits dem Vergleich mit dem SB 2/1 und andererseits der Beurteilung des Übergangsverhaltens, besonders im Vergleich zu anderen Sollwertzeitfunktionen. Weiterhin sollen damit eingestellte Arbeitspunkte der Hydraulikantriebe auf

ihre richtige Modellierung überprüft werden.

Im zweiten Teil werden die Hydraulikantriebe mit unterschiedlichen Sollwertzeitfunktionen als Steuergrößen beaufschlagt, die mit dem statischen Modell unter Berücksichtigung der im Abschnitt 2.2.5. dargestellten Parallelitätsbedingung berechnet wurden. Dies dient der Beurteilung und Verbesserung des verwendeten Berechnungsmodells sowie dem Vergleich der Wirkung der einzelnen Ansteuerfunktionen bei unterschiedlichen Bedingungen. Darüberhinaus sollen Erfahrungen für die Gestaltung von Regelkreisen zur Paralleelführung gesammelt werden.

Im dritten Teil schließlich wird die Lafettenpositionierung mit geregelter Paralleelführung untersucht, um die Wirkung unterschiedlicher Reglerparameter zu erkennen sowie Aussagen zum Hard- und Softwareaufwand für die Bohrwagengesamtsteuerung zu gewinnen.

3.2.2. Meßaufbau und Meßablauf

Meßaufbau der statischen Messungen

Entsprechend der im Abschnitt 2.2. dargestellten Koordinatensysteme sind zur Durchführung der Transformation außer den dort genannten Parametern (siehe Tabelle 4) die Größen $p_{1,0}$, $p_{2,1}$, $s_{3,2}$, $p_{4,3}$, $p_{5,4}$, $p_{6,5}$, $s_{7,6}$, γ , $h_{3,2}$, $h_{7,6}$ und α zu erfassen.

Die Messung der Größen $p_{1,0}$, $p_{2,1}$, $p_{5,4}$, $p_{6,5}$ erfolgt mit inkrementalen Gebern, deren Auflösungen Tabelle 11 zu entnehmen sind.

Zwei weitere Geber zur Erfassung der Schwenklagerzapfenneigung (5) und der Tragkonstruktionsdrehung (6) bei unterschiedlichen Gelenkstellungen haben Auflösungen von jeweils 1024 Inkrementen pro Umdrehung.

Die Größen $s_{3,2}$, $p_{4,3}$ und $s_{7,6}$ werden von Hand gemessen und die Zahlenwerte in den Rechner eingegeben.

Tabelle 11: Auflösungen der Winkelsensoren

Winkel	Geber Nr.	Geberauflösung /Inkrement pro Umdr./

$\varphi_{1,0}$	1	2500
$\varphi_{2,1}$	2	2500
$\varphi_{5,4}$	3	1024
$\varphi_{6,5}$	4	2500

Die Größen $h_{3,2}$, $\gamma_{3,2}$, $h_{7,6}$ und α sind nach Auswertung der gemessenen Lage der Meßpunkte 1 - 6 und Vergleich mit der ohne Biegung berechneten Lage bestimmbar.

Den Meßaufbau der statischen Messungen zeigt Anlage 7 - 5.

Als zentrale Koppereinheit zwischen Rechner und Bohrwagen wird eine Verteilerplatine verwendet, die eine Zuordnung der einzelnen Signale zu den Schnittstellen vornimmt.

Die Kopplung zwischen Rechner und Bohrwagen wurde unter Berücksichtigung der Ausführungen in /53/ vorgenommen.

Die digitalen Schaltsignale werden vom Mikrorechner erzeugt, über PIO- Karte und Verteilerplatine den Relaisstufen zugeführt und realisieren die Ansteuerung der Wegeventilmagnete. Die Schaltung der PIO- Karte ist /54/ zu entnehmen.

Die analogen Steuersignale werden ebenfalls vom Mikrorechner erzeugt und über eine DAU- Karte (Digital- Analog- Umsetzer) und die Verteilerplatine der Proportionalventilelektronik zugeführt. Das Blockschaltbild der DAU- Karte zeigt Anlage 7 - 6. Durch die Adreßdekodierung für jeden DAU- Kanal werden zwei aufeinanderfolgende Datenbytes gleichzeitig an die Digitaleingänge des Wandlerschaltkreises gelegt. Die aus 10 bit umgesetzte analoge Spannung im Bereich ± 10 V am Wandlerausgang bleibt bis zum Eintreffen der nächsten Datenbytes erhalten.

Die Funktionen "Bohrarm schwenken;heben/senken", "Lafette schwenken;kippen;aus-/einfahren" sind somit von der Rechner-tastatur aus verfügbar.

Zur Erfassung der Istwerte der Gelenkstellungen werden IGR

eingesetzt, die über 3 CTC- Karten angesteuert werden, was im Abschnitt 3.1.2. beschrieben wird.

Die mit dem äußeren Meßsystem bei den statischen Messungen anzumessenden Punkte sind in der folgenden Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Koordinaten der Meßpunkte

Mp Nr.	Koord.- system	x /mm/	y /mm/	z /mm/
1	7	66	94	- 130
2	6	143	228	1570
3	6	143	228	-1109
4	3	0	145	0
5	2	- 174	70	1829
6	2	- 218	193	0
7	1	- 409	396	163
8	0	234	-1147	145
9	0	-4025	- 867	840

Die Messungen werden nur mit oben liegender Lafette durchgeführt, sodaß die Einführung weiterer Meßpunkte entfällt.

Meßablauf der statischen Messungen

Vor Beginn der eigentlichen Messungen ist das Einnehmen der Grundstellung zur Gebernulldpunktfestlegung erforderlich. Die horizontale Lage von Bohrrarm und Lafette wird dabei mit dem Theodolitenmeßsystem überprüft. Zusätzlich sind in regelmäßigen Abständen während der Messungen die Positionen der Meßpunkte 8 und 9 zur Kontrolle der Lage des Bohrwagenchassis zu überprüfen.

Nach einem festgelegten System werden die einzelnen Gelenkstellungskombinationen von Hand eingestellt und die Meßpunkte Mp 1 bis 7 nach Beruhigung des Gesamtsystems mit dem Theodo-

litenmeßsystem angemessen. Eine Kontrolle ist durch die Anzeige der Vorgabewerte und der Meßwerte auf dem Monitor möglich.

Nach Abspeicherung der Meßwerte (siehe Abschnitt 3.1.2.) auf Diskette wird die nächste Meßstellung angefahren.

Anlage 5 - 3 zeigt das Struktogramm des zur Meßwerterfassung bei den statischen Messungen erstellten Programmes "PROPSTAT". Das Programm ist vollständig in Turbo-Pascal geschrieben und benützt darüberhinaus 4 Funktionen (BDOS) des Betriebssystems SCP 1520. Der Textumfang beträgt 52 kbyte, das compilierte Programm ist 35 kbyte lang.

Meßaufbau der dynamischen Messungen, Teil 1 und 2

Außer der im Abschnitt 1.2. dargelegten Beschränkung der Bewegungen auf vertikale Positionierung waren bei der praktischen Durchführung der Messungen auf Grund des vorhandenen Meßaufbaues sowie des Steuerrechners weitere Besonderheiten zu beachten, die im folgenden erläutert werden sollen.

1. Die alleinige Ansteuerung der Proportionalstromregelventile zur Erreichung einer Bewegung ist nicht ausreichend. Auf Grund der Gestaltung der Hydraulikkreisläufe sind dazu noch die Funktionen "Sperrern F-Kanal" bzw. "Bewegung gedämpft" erforderlich /20/.
2. Auf Grund der Speicherkapazität des zur Messung zur Verfügung stehenden Mikrorechners BCA 5120 ist bei Abfrage aller Sensoren (6 inkrementale Geber, 1 Drucksensor) und Ergebnisaufnahme auf dem RAM eine Maximalzahl von ca. 500 Tastwerten pro Sensor nicht überschreitbar. Weiterhin sind unter Nutzung des System-CTC zur Zeitsteuerung Abtastraten nur im Bereich von 26 ms - 200 µs (38 Hz - 5kHz) ohne Kaskadierung oder Softwarezähler möglich.
3. Während der Positionierung mit geregelter Parallelführung nach Abschnitt 2.3.7. ist wegen der hohen Geschwindigkeitsanforderungen und dem vorhandenen Speicherplatz eine Ablage der Sensordaten auf den RAM zur späteren Auswertung nicht möglich.

Unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen wurden folgende Festlegungen getroffen:

1. Für die Untersuchungen mit gesteuerter Parallelführung werden ein maximaler Verfahrbereich von 10 grd und eine Anzahl von 400 Tastwerten festgelegt. Für die Berechnung der Ansteuerfunktionen ist die Bewegungsdauer so zu wählen, daß die Abtastraten im angegebenen Bereich liegen.
2. Die Beurteilung der Bewegung bei den Untersuchungen mit geregelter Parallelführung erfolgt einerseits subjektiv und andererseits mit Hilfe einer Videokamera als äußeres Meßsystem. Die Endposition wird mit Hilfe der inkrementalen Geber ausgewertet.
3. Aus Gründen der Erhöhung der Abfragegeschwindigkeit ist eine veränderte Anbringung des Bohrarmvertikalgebers ($\rho_{2,1}$) gegenüber den statischen Messungen erforderlich. Die Montage erfolgt direkt auf der Drehachse des Bohrarmhubgelenkes.

Darüberhinaus ist für die Gelenke $\rho_{2,1}$ und $\rho_{5,4}$ der Einsatz von Gebern gleicher Auflösung erforderlich. Deshalb werden für beide Vertikalgeber solche mit 2500 Inkrementen pro Umdrehung eingesetzt.

Die Geberauflösungen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 13: Auflösungen der Winkelsensoren

Winkel	Geber Nr.	Geberauflösung /Inkrement pro Umdr./
$\rho_{1,0}$	1	1024
$\rho_{2,1}$	2	2500
$\rho_{5,4}$	3	2500
$\rho_{6,5}$	4	2500

Die Geber 5 und 6 wurden gegenüber den statischen Messungen nicht verändert.

Ein zusätzlicher 7. inkrementaler Geber zur Messung der Lafet-

tenausfahrlänge, der anstelle des Gebers 6 angeschlossen werden kann, wurde zu Testzwecken angebracht und besitzt eine Auflösung von 400 Inkrementen pro Umdrehung. Die Meßgenauigkeit für die Lafettenausfahrlänge beträgt damit ± 0.25 mm.

Anhand Anlage 7 - 7 wird der Meßaufbau der dynamischen Messungen erläutert.

Die mit Hilfe des angeschlossenen Bedienpultes erzeugten analogen Steuerspannungen der Bewegungen Bohrarm schwenken links/rechts, Bohrarm heben/senken, Lafette kippen auf/ab, Lafette schwenken rechts/links werden über die Verteilerplatte 4 Kanälen einer ADU - Karte (/56/) im Mikrorechner zugeführt, wobei die bedienpultinternen Verstärker auf Ausgangsspannungen von maximal ± 1 V eingestellt werden, damit eine ordnungsgemäße Funktion der ADU gewährleistet ist. Auch die Signale "Lafette aus- und einfahren" sowie die Ausgangsspannung des am Fußpunkt des Bohrarmhubzylinders angebrachten Drucksensors werden über die ADU- Karte ausgewertet. Auf Grund der geringen Ausgangsspannung des Sensors (/57/) wird ein in seiner Verstärkung umschaltbarer Vorverstärker (Faktor 5 oder 10) eingefügt, durch den der Bitfehlereinfluß des AD- Wandlers verringert wird.

Das Blockschaltbild der ADU- Karte ist Anlage 7 - 8 zu entnehmen. Über softwaremäßig steuerbare Analogschalter wird dem AD- Wandlerschaltkreis jeweils eine der sieben Analogspannungen zugeführt. Dabei können mit den beiden ersten Kanälen ± 10 V und mit den anderen 5 Kanälen ± 1 V verarbeitet werden. Nach Ablauf der Umsetzzeit (ca. 30 μ s) steht das Ergebnis der Wandlung als 11- Bit- Wert (10 Bit Amplitude, 1 Bit Vorzeichen) zur Verfügung und kann über den PIO- Schaltkreis mit 2 8- Bit- Lesebefehlen übernommen werden.

Bei den Messungen zum ersten und zweiten Teil nach Abschnitt 3.2.1. ist kein bohrwagenexternes Meßsystem vorhanden. Die Beurteilung der Bewegung erfolgt mit den Sensordaten und durch visuelle Beobachtung.

Zur Vorbereitung dieser Messungen sind mit Hilfe der Modellierungsprogramme "SPRUNG" bei Sollwertsprüngen der Antriebssteuerspannungen bzw. "VERT12" bei Ansteuerspannungen nach

Abschnitt 2.3.6. für eine festzulegende Anzahl von Stützstellen die auszugebenden Spannungen zu berechnen und auf Diskette abzuspeichern.

Für die Messungen wurde das Programm "PROPVENT" erstellt, das im Dialog durch die gesamte Messung führt. Das Struktogramm des Programmes "PROPVENT" ist in Anlage 5 - 4 dargestellt. Das Programm ist in Turbo-Pascal geschrieben, benützt 4 Betriebssystemfunktionen(BDOS) und besitzt aus Gründen der Geschwindigkeitserhöhung Assemblerprogrammteile (/58/).

Der Programmtext ist 76 kbyte lang, das compilierte Programm hat eine Größe von 54 kbyte.

Meßablauf der dynamischen Messungen, Teil 1 und 2

Zur Nullpunktfixierung der IGR wird vor Beginn der Messungen die Grundstellung eingenommen. Nach dem Rücksetzen der IGR ist die den berechneten Steuerspannungswerten zugrundeliegende Bezugsstellung mit Hilfe der Bedienelemente von Hand einzustellen. Über den Rechnermonitor werden zur Positionierungsunterstützung und Kontrolle die aktuellen Gelenkstellungen angezeigt.

Nach dem Einladen der berechneten Steuerspannungswerte von Diskette wird durch Tastendruck das Unterprogramm "AUFNAHME" gestartet, was diese Abtastwerte aus dem RAM des Mikrorechners interruptgesteuert in einem wählbaren Zeitraster an die Proportionalventilelektronik ausgibt. Gleichzeitig werden die Istwerte der Gelenkstellungen sowie der Hydraulikdruck am Fußpunkt des Bohrarmhubzylinders erfaßt und im RAM abgelegt, wobei keine Bewertung der Istwerte im Sinne einer Regelung erfolgt.

Nach Abschluß der Positionierung besteht die Möglichkeit der pseudographischen Darstellung der Meßwerte. Steuerspannungs- und Meßwerte sind zur weiteren Auswertung auf Diskette abspeicherbar.

Meßaufbau und Meßablauf der dynamischen Messungen, Teil 3

Die Messungen zur geregelten Parallelführung werden mit dem Meßaufbau nach Anlage 7 - 7 durchgeführt. Zur Untersuchung des Lafettenverhaltens während der Bewegung wurde als äußeres Meßsystem das an der TH Ilmenau entwickelte Erkennungssystem "IBS 22" verwendet. Die Meßeinrichtung besteht aus einer Videokamera und einem Videorecorder als Bildspeicher. Die Auswertung der Bilder wird nach automatischer Digitalisierung am Mikrorechner durchgeführt. Das auswertbare Bildfenster hat eine Größe von $256 * 256$ Bildpunkten bei 16 Graustufen bzw. Farben. Nähere Einzelheiten des Systems sind /59/ zu entnehmen.

Die zu erfassenden Bewegungen wurden so abgestimmt, daß ein Verfahrbereich von ca. 50 cm in vertikaler Richtung überstrichen wurde. Damit entspricht der Abstand zweier Bildpunkte des Erkennungssystems etwa 2 mm. Als Meßobjekt wurde ein zur Lafettenfarbe kontrastierender 50 cm langer Streifen an der Tragkonstruktion angebracht. Die Bewegungen wurden sowohl mit Handsteuerung als auch mit automatischer Positionierung durchgeführt.

3.2.3. Auswertung und Ergebnisse

Zur Bewertung des kinematischen Modells wurden die 28 verschiedenen Gelenkstellungskombinationen der statischen Messungen analysiert. Der Vergleich von gemessenen und mit starren Transformationsbeziehungen berechneten Positionen der einzelnen Meßpunkte bestätigt die Ergebnisse der am SB 2/1 durchgeführten Untersuchungen. Die unter Berücksichtigung von Bohrarm- und Lafettendurchbiegung mit dem Programm "MULTINEU" ermittelten Positionen haben zu den Meßwerten folgende Abweichungen im Bezugskoordinatensystem:

Tabelle 14: Abweichungen der Meßpunkte im
Bezugskoordinatensystem in mm

Meßpunkt	1	2	3	4	5
Δx_0	74	83	90	77	36
Δy_0	211	66	30	29	9
Δz_0	168	106	14	37	26

Diese Abweichungen sind auf folgende Einflüsse zurückzuführen, die durch Beobachtungen erfaßt wurden:

1. Torsion von Bohrarm und Kreuzgelenk

Beide Einflüsse wirken besonders bei seitlich geschwenktem Bohrarm und führen an der Lafettenspitze zu Positionsabweichungen von maximal ± 35 mm in Richtung z_0 .

2. Spiel im Lafettendrehantrieb und der Lafette in der Tragkonstruktion

Das Spiel der Lafette in der Tragkonstruktion führt zu Positionsabweichungen der Lafettenspitze in y_0 - und z_0 -Richtung beim Ein- und Ausfahren von maximal ± 10 mm.

Besonders bei seitlich geschwenktem Bohrarm hat das Spiel im Lafettendrehantrieb Einfluß und bewirkt Positionsabweichungen der Lafettenspitze beim Ein- und Ausfahren der Lafette von ± 10 mm in Richtung z_0 .

3. Fehler bei der Transformation von Theodolitenmeßwerten in das Bohrwagenbezugssystem

Die von der Abteilung Industrievermessung des VEB Kalibetrieb Werra angegebene Genauigkeit der Theodolitenmeßwerte beträgt ± 1 mm im Theodolitenkoordinatensystem. Bei der Umrechnung in das Bohrwagenkoordinatensystem treten Fehler auf, die aus der Meßgenauigkeit der Theodoliten, der Ungenauigkeit der Positionsangabe der Meßpunkte (siehe Punkt 5) und Rundungsfehlern bei der Berechnung begründet sind. Aus der Lage der Theodoliten zum Bohrwagen werden

folgende Meßungenauigkeiten in Richtung der Koordinatenachsen bezüglich des Abstandes zum Koordinatenursprung abgeschätzt:

$$\Delta x_0 = 2 \text{ mm/m}; \quad \Delta y_0 = 5 \text{ mm/m}; \quad \Delta z_0 = 1 \text{ mm/m}$$

4. Fertigungsungenauigkeiten

Die Lage der Meßpunkte auf den einzelnen Bohrwagenteilen wurde anhand der Zeichnungen bestimmt. Eine Vermessung der Bohrwagenteile war nicht möglich, sodaß die Lageabweichung der Meßpunkte in ihren jeweiligen Koordinatensystemen mit $\pm 1 \text{ mm}$ abgeschätzt wird.

5. Einrichtungsungenauigkeiten in der Grundstellung

Auf Grund der relativen Winkelmessung mit den IGR war die Einnahme der Grundstellung zur Gebernulldpunktfixierung erforderlich. Für die Einrichtung der Antriebe 2,1 und 5,4 wurde dazu das Theodolitensystem zur Einstellung der Horizontallage von Bohrarm und Lafette verwendet. Eine Einstellung der Antriebe 1,0 und 6,5 war damit nicht möglich. Die Nullage dieser Antriebe wurde von Hand mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5^\circ$ eingestellt. Dieser Fehler geht als konstanter Wert für alle Messungen ein.

6. Meßungenauigkeiten der IGR

Aus der Meßungenauigkeit der IGR läßt sich für den ungünstigsten Fall (Lafette ausgefahren) eine Positionsabweichung der Lafettenspitze von $\pm 20 \text{ mm}$ in y_0 - und z_0 -Richtung ermitteln.

Mit den angegebenen Einflußgrößen läßt sich der absolute Fehler möglicher Abweichungen von gemessenen und modellierten Positionen der Lafettenspitze für den ungünstigsten Fall wie folgt abschätzen:

$$\Delta x_0 = 40 \text{ mm}; \quad \Delta y_0 = 210 \text{ mm}; \quad \Delta z_0 = 105 \text{ mm}$$

Diese Werte zeigen, daß das vorhandene Modell, welches bisher nur die Einflußgröße Biegung berücksichtigt, eine Genauigkeit besitzt, die den praktischen Bedingungen entspricht. Auf Grund des zur Verfügung stehenden Zeitfonds und der Abgrenzung zu anderen Aufgaben war es nicht möglich, die anderen Einflußfaktoren näher zu analysieren, sie mathematisch zu formulieren und in die Modellierung einzubeziehen. Deshalb wurde für die weiteren Untersuchungen vorerst die aufgezeigte Genauigkeit als ausreichend erachtet.

Eine bisher nicht genannte Einflußgröße der Positionierung ist die Kompressibilität des Öles in den Hydraulikzylindern. Sie bewirkt über die Ausfahrlängenänderung eine Veränderung der jeweiligen Gelenkstellung. Diese wird aber mit den IGR erfaßt und geht somit nicht in die genannte Positionsabweichung als Differenz von Rechnung und Messung ein. Ihr Einfluß sei dennoch an dieser Stelle erläutert. Die Ausfahrlängenänderung eines Hydraulikzylinders durch Kompression ist bei sonst konstanten Bedingungen von seiner Größe und dem vorhandenen Ölvolume abhängig. Bei Aus- und Einfahren der Lafette treten an den Vertikalzylindern von Bohrarm und Lafette Kompressionen durch den Lastwechsel auf. Für den Bohrarmantrieb sind sie bei angehobenem Bohrarm am größten und bewirken eine Winkelveränderung von $\varphi_{2,1}$ um maximal 0.3° . Beim Lafettenantrieb sind die Veränderungen für horizontale Bohrarm- und Lafettenlage am größten und betragen maximal 2.5° . Eine Abschätzung der Ölkompensation für den Lafettenantrieb aus den Lastverhältnissen ergibt einen Wert von 1.6° , sodaß der angegebene Maximalwert auf unzureichende Antriebsentlüftung schließen läßt.

Die Anlagen 3 - 6 bis 3 - 9 zeigen die mit sprungförmigen Steuerspannungsverläufen ermittelten Meßwerte. Im einzelnen sind dargestellt:

- Meßkurve von 1,0
- Meßkurve von 2,1
- Meßkurve von 5,4
- Meßkurve von 6,5

- Meßkurve Pendelgeber Schwenklagerzapfen f_{SI}
- Meßkurve Pendelgeber Tragkonstruktion f_{Tr}
- Steuerspannungsverlauf der Antriebe 2,1 und 5,4
- Meßkurve des Drucksensors am Bohrarmhubzylinder

Dabei wurden Messungen zu folgenden Sollwertverläufen durchgeführt:

- Sollwertsprung auf den Antrieb 2,1 (2.9 V)
- Sollwertsprung auf den Antrieb 5,4 (2.9 V)
- Sollwertsprünge auf die Antriebe 2,1 und 5,4 (2.9 V)
- Sollwertsprung auf den Antrieb 2,1 (10 V)

Diese Messungen stellen eine Wiederholung der am SB 2/1 durchgeführten dar und bestätigten die dort gewonnenen Erkenntnisse. Mit dem erweiterten Experimentieraufbau sind durch die Antriebsansteuerung über Mikrorechner verbesserte Voraussetzungen zur Synchronisation von Messung und Bewegung sowie zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben.

Für die Untersuchung des Verhaltens beim Ein- und Ausschalten eines Spannungswertes wurden von jeweils 400 Tastwerten die ersten 200 mit dem angegebenen Sollwert und die zweiten 200 mit dem Wert "0 V" gefüllt. Der Spannungswert von 2.9 V stellt einen mittleren Kennlinienpunkt dar und für 10 V wird die maximale Ventilaussteuerung mit Sicherheit erreicht.

Im Vergleich zum SB 2/1 sind an den Pendelgebern kleinere Schwingungsamplituden meßbar. Dies ist auf die geringere Laffettenlänge (5.4 gegenüber 7.25 m) und die größeren Schaltzeiten der Proportionalstromregelventile gegenüber den Wegeventilen zurückzuführen (/46/ /48/).

Gegenüber dem SB 2/1 sind bei Ansteuerung des Antriebes 2,1 in keinem Fall Beeinflussungen des Antriebes 1,0 nachweisbar.

Beim Vergleich der Sollwertsprünge am Antrieb 2,1 sind bei 10 V Amplitude die Schwingungsamplituden etwa doppelt so groß wie bei 2.9 V. Da die Ventile bei 6.5 V bereits ihre Maximalaussteuerung erreichen und keine weitere Erhöhung mehr möglich ist, sind die angegebenen Verhältnisse realistisch.

Obwohl ausschließlich Vertikalbewegungen durchgeführt werden, ist der Einfluß auf den senkrecht zur Bewegungsrichtung stehenden Tragkonstruktionsgebers nachweisbar.

Weiterhin ist mit dem verbesserten Meßaufbau bei Sollwertsprüngen am Bohrarmantrieb zu erkennen, daß beim Einschalten der Sollspannung kaum Schwingungen auftreten, wogegen durch das Ausschalten Schwingungen eingeleitet werden. Da der Bohrarm eine Aufwärtsbewegung ausführt, ist am Ende der Bewegung die Massenträgheit von Bohrarm und Lafette durch Abbremsen aus konstanter Geschwindigkeit für diesen Effekt verantwortlich.

Für die Sollwertsprünge der Lafette sind die Schwingungseingleitungen am Anfang und Ende der Bewegung feststellbar. Da die Lafette eine Abwärtsbewegung ausführt, wirkt das Eigengewicht als Unterstützung für die Bewegung und wird somit am Anfang schneller beschleunigt. Dies ist auch an der größeren Winkelgeschwindigkeit (Anstieg von $\varphi_{5,4}$) am Bewegungsanfang, die noch durch Ölkompensation und Lufteinschlüsse verstärkt wird, zu erkennen.

Bei Sollwertsprüngen an Bohrarm- und Lafettenantrieb sind die Überlagerungen beider Vorgänge sichtbar.

Auch am Druckverlauf des Bohrarmhubzylinders sind die beschriebenen Einflüsse nachweisbar, wenngleich durch der Meßspannung überlagerte Brummspannungen eine genaue Analyse verhindert wird.

Aus den dargestellten Untersuchungen ist erkennbar, daß das Antriebsverhalten für Auf- und Abwärtsbewegung unterschiedlich ist. Dies ist bei der Auslegung von Steuerungen und Regelungen für die Antriebe im Interesse möglichst geringer Schwingungsbelastungen zu berücksichtigen.

Die Messungen zur gesteuerten Parallelführung wurden mit zwei unterschiedlichen Kennlinienapproximationen der Steuerungs- Ölstromkennlinien der Proportionalstromregelventile (siehe Abschnitte 2.3.6. und 2.4.) durchgeführt. Als Meßkurven sind nur die der verbesserten Approximation nach Abschnitt 2.4. in Anlage 4 dargestellt. Folgende Verläufe sind für jede Messung angegeben:

- Soll- und Meßkurve von $\varphi_{2,1}$
- Soll- und Meßkurve von $\varphi_{5,4}$
- Meßkurve Pendelgeber Schwenklagerzapfen φ_{S1}
- Meßkurve Pendelgeber Tragkonstruktion φ_{Tr}
- Spannungsverlauf der Antriebe 2,1 und 5,4
- Meßkurve des Drucksensors am Bohrarmhubzylinder

Die Sollbewegung ist für den Antrieb 2,1 von $\varphi_{2,1} = 280^\circ$ auf $\varphi_{2,1} = 285^\circ$ und für den Antrieb 5,4 von $\varphi_{5,4} = 80^\circ$ auf $\varphi_{5,4} = 75^\circ$ festgelegt. Das bedeutet für den Bohrarm eine Aufwärts- und für die Lafette eine Abwärtsbewegung. Die Bewegungen bestanden nur aus Beschleunigungs- und Bremsphasen gleicher Länge; auf einen Teilabschnitt mit konstanter Geschwindigkeit wurde verzichtet. Um die Meßkurven der unterschiedlichen Ansteuerzeitfunktionen vergleichen zu können, war die Bewegungsdauer für alle Vorgänge auf 10 Sekunden festgelegt worden. Da auch die zu erreichende Maximalgeschwindigkeit der Antriebe für alle Bewegungen entsprechend der zur Verfügung stehenden Ölmenge gleich ist, ergeben sich aus der Modellierung außer unterschiedlichen Verläufen auch verschiedene Maximalwerte der Beschleunigung.

Die Bewegungen wurden für folgende Ansteuerzeitfunktionen mit ein- und ausgefahrner Lafette als wechselnde Lastbedingungen durchgeführt:

- Rechteck
- Dreieck
- Sinus
- Sinoide
- Roboter

Anhand der Meßwerte sind Schwingungen nur für Bewegungen mit ausgefahrner Lafette nachweisbar. Dabei sind diese für den dreieck- und rechteckförmigen Beschleunigungsverlauf am größten, wobei die Pendelausschläge mit einem Geberinkrement ($\hat{=} 0.088^\circ$) insgesamt als gering zu bezeichnen sind.

Um den Einfluß der Beschleunigung bei gleichbleibender Form

der Ansteuerzeitfunktion untersuchen zu können, wurden mit der Ansteuerfunktion Roboter drei weitere Messungen bei Bewegungen mit unterschiedlicher Beschleunigungszeit und konstanter Geschwindigkeit im Mittelteil der Gesamtbewegung bei ausgefahrener Lafette durchgeführt. Als Beschleunigungszeiten zur Erreichung der jeweils gleichen Geschwindigkeit wurden 2, 1 und 0.4 Sekunden festgelegt. Der Mittelteil ist jeweils 6 Sekunden lang, sodaß sich unterschiedliche Gesamtbewegungsdauern ergeben. Die Meßkurven bestätigen, daß mit zunehmender Maximalbeschleunigung (abnehmender Beschleunigungszeit) die Einleitung von Schwingungen vergrößert wird. Für Beschleunigungszeiten von 0.8 bis 1 Sekunde, was einer Beschleunigung von etwa 0.1 ms^{-2} entspricht, wurden die günstigsten Verhältnisse von Gesamtbewegungszeit und Schwingungsverhalten ermittelt.

Aus den dargestellten Ergebnissen sind erste Schlußfolgerungen für die Bemessung von Reglerparametern und Abtastintervallen ableitbar.

Die Gründe für die mit Anlage 4 nachgewiesenen Abweichungen von Soll- und Istposition der Gelenke am Bewegungsende, die maximal für den Lafettenantrieb 70 % und für den Bohrramantrieb 14 % betragen, wurden im Abschnitt 2.4. dargelegt, wobei für ausgefahrene Lafette die Endwerte der Positionierung weniger abweichen als für eingefahrene Lafette. Die ist auf die bewegungsunterstützende Wirkung des Lafetteneigengewichtes auf die vorgesehene Bewegung im ausgefahrenen Zustand zurückzuführen.

Die mit dem Videomeßsystem aufgezeichneten Vorgänge bei der geregelten Parallelführung der Lafette waren auf Grund des durch die Bewegung hervorgerufenen Bildpunktübersprechens (Verwischung der Kanten) nicht mit der nötigen Genauigkeit von $\pm 1 \text{ cm / m}$ auswertbar. Der erkennbare Gesamteindruck der Bewegung unterstützt die Aussagen im Abschnitt 2.4. Bei zukünftigen Messungen ist zur genaueren Beurteilung der Bewegungsvorgänge die Verwendung einer hochauflösenderen Kamera (z.B. $1024 * 1024$ Bildpunkte) einschließlich dem zugehörigen

Auswertesystem oder die noch weitere Reduzierung des Bewegungsbereiches erforderlich.

Aus den Untersuchungen zum Einfluß der Beschleunigung auf das Bewegungsverhalten sowie unter Beachtung des Zeitverhaltens der Proportionalstromregelventile sind die für die digitale Regelung notwendige Abtastintervalle mit etwa 10 ms abschätzbar. Diese wurden in den angegebenen Programmen verwendet. Die Bewegungen zur Positionierung wurden auf Grund der integralen Wirkung des Gesamtaufbaues und aus Zeitgründen nur mit dem P-Regler durchgeführt. Dabei zeigten sich bei Verstärkungswerten von etwa 40 für den Bohrarm- und 20 für den Lafettenantrieb die besten Bewegungsverläufe bei Auf- und Abwärtsbewegungen. Verstärkungen unter 30 beim Bohrarmantrieb führten wegen der vorhandenen Nullüberdeckung der Ventile zu großen Ausregelzeiten in der Endposition, wogegen bei Verstärkungen über 50 zunehmende Schwingungen die Positionierung beeinflussen bzw. sogar ganz unmöglich machen. Für den Lafettenantrieb liegen die Grenzwerte bei 15 bzw. 30. Innerhalb der angegebenen Verstärkungsbereiche wurden Werte ermittelt, bei denen für die Abwärtsbewegung des Bohrarmes starke Schwingungen ergaben, wogegen während der Aufwärtsbewegung keine Schwingungen festgestellt werden konnten.

4. Varianten von Antriebsansteuerungen und ihre Realisierung am SB 2/2

=====

4.1. Direkte Handsteuerung der Proportionalwegeventile

Diese Variante ist dadurch gekennzeichnet, daß die mit Handsteuerhebeln erzeugten Steuerspannungen der Proportionalventilelektronik zugeführt werden und somit eine direkte Ansteuerung der Ventile erreicht wird. Das Prinzip zeigt Abbildung 17.

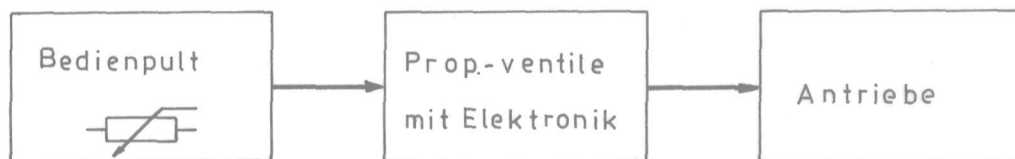


Abbildung 17: direkte Handsteuerung, Prinzip

Die Kontrolle der Bewegung erfolgt ausschließlich über den Bediener, wodurch auf eine aufwendige Sensorik zur Positionierung verzichtet werden kann. Der zusätzliche Aufwand zur Realisierung dieser Variante beschränkt sich deshalb auf die Verwendung eines neuen Bedienpultes mit Handsteuerhebeln zur Erzeugung der Steuerspannungen und den Einsatz von Proportionalwegeventilen mit zugehöriger Elektronik für die Bohrarm- und Lafettenbewegungen.

Die Vorteile dieser Variante gegenüber den derzeitig eingesetzten Bohrwagen liegen in der Verbesserung des Bewegungsverhaltens durch unabhängige und proportionale Ansteuerung der Antriebe bei einfachem Aufbau. Der Zeitaufwand für die Positionierung verringert sich und für den Bohrwagenfahrer ist keine Umstellung in der Bedienreihenfolge erforderlich.

Die Nichteinhaltung der Parallelitätsbedingung bei der La-

fettenführung muß als Hauptnachteil angesehen werden. Die Genauigkeit von Position und Orientierung der Lafette hängen nur vom Bediener ab.

Das Funktionsschema der am SB 2/2 realisierten Variante der direkten Handsteuerung zeigt Anlage 7 - 9.

Die Betätigungselemente für die Funktionen kippen und schwenken von Bohrarm und Lafette sowie Lafette aus- und einfahren sind in einem abgesetzten Bedienpult untergebracht. Nur die Funktionen Teleskop aus- und einfahren sowie Lafette drehen werden vom Bohrwagenbedienpult realisiert.

Die von einem Netzteil bereitgestellten Spannungen werden durch die von Kreuzknüppeln bewegten Potentiometer des Bedienpultes in analoge Steuerspannungen umgesetzt, wobei die Signale Bohrarm kippen, Lafette kippen und Lafette schwenken verstärkt werden, sodaß die direkte Ansteuerung der Proportionalventilelektronik möglich ist. Alle Signale werden der Zwischenplatine zugeführt, die 2 Funktionen erfüllt:

1. Umwandlung der analogen Steuerspannung des Signals "Bohrarm schwenken" in ein digitales Schaltsignal zur Wegeventilansteuerung
2. Erzeugung der Schaltsignale "Sperrten F-Kanal" und "Bewegung gedämpft" für Bohrarm und Lafette aus den analogen Steuersignalen mit Hilfe von Fensterkomparatoren

Die erzeugten digitalen Schaltsignale werden zusammen mit dem Signal "Lafette aus- und einfahren" den Relaisstufen zugeführt, mit denen die Ansteuerung der Wegeventilmagnete ermöglicht wird. Die analogen Steuersignale werden direkt der Proportionalventilelektronik zugeführt, die in Verbindung mit den ablaufgeregelten Proportionalstromregelventilen eine nahezu lastunabhängige Steuerung des Ölstromes ermöglichen /29/. Bei gleichzeitiger Betätigung mehrerer Bohrarm- und Lafettenbewegungen ist eine gegenseitige Beeinflussung auf Grund der angewandten Hydraulikkreisgestaltung zu erwarten.

Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Schaltungen ist /3/ zu entnehmen.

4.2. Automatische Lafettenpositionierung mit vorausberechneter Parallelführung

Bei dieser Variante werden die für eine Bewegung notwendigen Steuerspannungen mit einem rechnerinternen Modell berechnet und dann an die Proportionalwegeventile ausgegeben. Das Prinzip ist in Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: automatische Lafettenpositionierung mit
vorausberechneter Parallelführung, Prinzip

Das Steuerungsprinzip erlaubt es, auf umfangreiche Sensorik zur Positionserfassung zu verzichten. Damit werden aber gleichzeitig höhere Anforderungen an die Modellierung und die Ausrichtung des Bohrwagens vor der Ortsbrust gestellt. Da die erreichbare Genauigkeit der Positionierung von den erfaßten Einflußgrößen abhängt und mit zunehmender Modellgröße Rechenzeit- und Speicherplatzbedarf ansteigen, ist der Einsatz leistungsfähiger Rechentechnik erforderlich.

Kann für unterschiedliche Abschlüsse von einer gleichbleibenden Lage des Bohrwagens zur Bohrebene ausgegangen werden und sind zur Abarbeitung eines Bohrschemas stets die gleichen Bewegungen notwendig, so kann die Berechnung der Steuerspannungen für die Antriebe "Offline" und außerhalb des technologischen

Prozesses für das gesamte Bohrschema auf einmal erfolgen. Für die Ausgabe der einzelnen Spannungswerte ist dann am Bohrwagen nur eine Ablaufsteuerung erforderlich, die nicht unbedingt einen Mikrorechner erfordert.

Sind dagegen die o. g. Bedingungen nicht gegeben, so muß die Berechnung der einzelnen Steuerspannungstastwerte zwischen Start- und Zielpunkt der Positionierung im technologischen Prozess durchgeführt werden. Bei ausreichender Rechengeschwindigkeit sowie genügend Speicherplatz für das Modell ist die Berechnung in Echtzeit und "Online" möglich. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, erfolgt die Antriebsansteuerung erst nach Beendigung der Berechnung aller Steuerspannungen.

Für die Berechnung der Bewegungen im technologischen Prozeß müssen in dem dazu notwendigen Bordrechner Angaben zur Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene sowie zum Bohrschema zur Verfügung gestellt werden. Dies kann entweder automatisch mit den dann ebenfalls notwendigen Sensoren oder von Hand nach Vermessung durch den Bohrwagenfahrer über ein entsprechendes Bedienpult erfolgen.

Der Vorteil dieser Ansteuervariante gegenüber den derzeitigen Bohrwagen besteht in der Einhaltung der Parallelitätsbedingung und der Automatisierung des Bewegungsablaufes im technologischen Prozeß, wobei unter den angegebenen Bedingungen ohne aufwendige Sensorik gearbeitet werden kann.

Gegenüber dem relativ geringen technischen Aufwand am Bohrwagen ist die Erstellung eines möglichst viele Einflüsse berücksichtigenden Modells sehr aufwendig. Beim praktischen Einsatz ist darüberhinaus zu beachten, daß auf nichtmodellierete (zufällige) Einflüsse des technologischen Prozesses nicht reagiert werden kann.

Die am SB 2/2 realisierte Variante dieser Ansteuerung wird im Abschnitt 2.3.6. beschrieben. Die Steuerspannungsberechnung erfolgt mit dem Steuerrechner unter Berücksichtigung der Parallelitätsbedingung "Offline" mit dem Programm "VERTI2" und die Ausgabe wird mit dem Programm "PROPVENT" durchgeführt.

4.3. Handsteuerung mit geregelter Lafettenparalleelführung

Das Wesen dieser Ansteuervariante liegt darin, daß ein Antrieb einer Bewegungsebene direkt von einem Handsteuerhebel betätigt und die korrespondierenden Antriebe geregelt nachgeführt werden. Damit wird die ständige Lafettenparalleelführung gegenüber einer Bezugsstellung mit Hilfe eines Mikrorechners bei Handpositionierung erreicht. Das Prinzip ist in Abbildung 19 dargestellt.

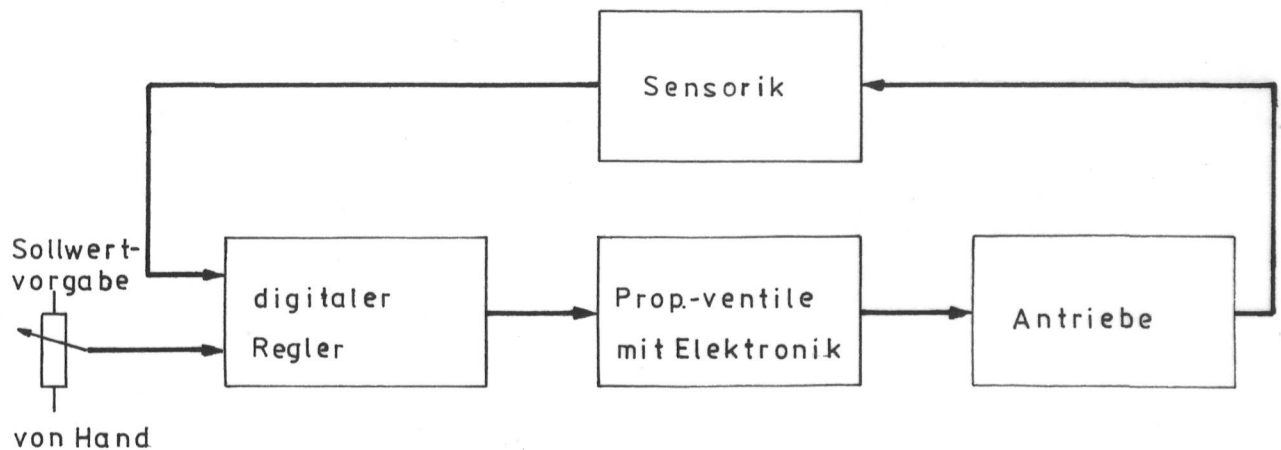


Abbildung 19: Handsteuerung mit geregelter
Lafettenparalleelführung, Prinzip

Die Regelung erfolgt softwaremäßig digital. Zur ständigen Erfassung der Gelenkpositionen sind Sensoren einzusetzen, die in Geschwindigkeit und Genauigkeit den Anforderungen an die Positionierung entsprechen.

Der Einsatz eines Mikrorechners zur Positionierung ist auf Grund der sich in Abhängigkeit von den aktuellen Gelenkstellungen ständig verändernden Beziehungen zwischen den Gelenkkoordinaten erforderlich. Der einfachste Aufbau ergibt sich bei jeweils zwei Antrieben pro Bewegungsebene, weil dann nur je ein Antrieb geregelt werden muß. Dann ist der Einsatz von Einchiprechnern als dezentrale Regler und zur Entlastung des Hauptsteuerrechners sinnvoll.

Im Vergleich zu gegenwärtig eingesetzten Bohrwagen bietet diese Ansteuervariante den Vorteil, daß eine genaue und vom Bediener unabhängige Parallelführung für alle Lafettenpositionen realisiert wird. Für die Positionierung ist nur ein Bedienungselement erforderlich und der Zeitaufwand dafür wird stark verringert. Der Bediener ist für die Abarbeitung des gesamten Bohrschemas notwendig, wobei die Genauigkeit der einzelnen Bohrpositionen von ihm abhängt.

Der am SB 2/2 verwendete Aufbau ist mit dem im Abschnitt 2.3.7. beschriebenen identisch, wobei als Betätigungselement der Steuerhebel Bohrarm heben/senken des Bedienpultes verwendet wird. Der Regler ist ein digitaler PID- Algorithmus, der im gleichen Abschnitt erläutert wird.

4.4. Automatische Positionierung mit geregelter Lafettenparallelführung

Diese Variante ist durch das automatische Anfahren einer Zielposition mit ständiger Parallelführung der Lafette zu einer Bezugsstellung gekennzeichnet. Das Prinzip ist in Abbildung 20 dargestellt.

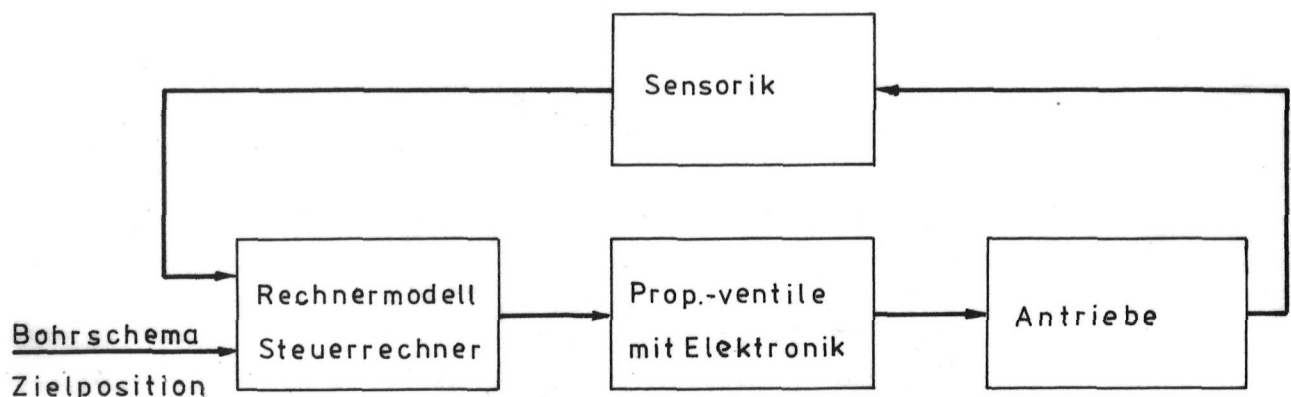


Abbildung 20: automatische Positionierung mit geregelter Lafettenparallelführung, Prinzip

Soll ein festes Bohrschema abgearbeitet werden, so erfolgt die Zielpositionsvorgabe automatisch aus dem im Rechner abgespeicherten Bohrschema. Sind einzelne bzw. vom Bohrschema abweichende Positionen anzufahren, kann die Zielvorgabe auch von Hand durch den Bediener erfolgen. Der Mikrorechner berechnet den günstigsten Fahrweg zwischen Start- und Zielposition mit konstanter Lafettenorientierung (des Startpunktes), ggf. mit Stützstellen, und steuert die Einzelantriebe an. Dabei erfolgt eine Regelung des langsamsten Antriebes gemäß der berechneten Bewegungssollkurve und die anderen Antriebe werden nach diesem Antrieb geregelt. Für jeden Antrieb ist dabei ein eigener Regler erforderlich.

Die Vorteile dieser Ansteuervariante gegenüber derzeitigen Bohrwagen ist die Automatisierung des Bohrprozesses bei vom Bediener unabhängiger Realisierung der Lafettenparallelführung und Positionierung, wodurch sich der Zeitaufwand zur Abbohrung eines Bohrschemas weiter verringert.

Die vorgestellte Variante der automatischen Lafettenpositionierung wurde ebenfalls am SB 2/2 mit dem Aufbau nach Abschnitt 2.3.7. realisiert. Die Eingabe der Reglerparameter für den PID-Algorithmus erfolgt ebenso wie die der Zielposition (als Winkelwert von $\varphi_{2,1}$) vor der Positionierung, wobei daraus für den gegenüber der Lafette langsameren Bohrrarmvertikalantrieb die Folge von Gelenkstellungen und zugehörigen Steuerungen berechnet wird. Dieser Antrieb wird nach den berechneten Gelenkstellungen geregelt, wogegen der Lafettenantrieb nach der aktuellen Bohrrarmstellung unter Berücksichtigung der Lafettenparallelführung geregelt wird.

5. Einordnung der Untersuchungsergebnisse in die Weiterentwicklung der Bohrwagen SB 2/1 und SB2/2

=====

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen dienen der Vorbereitung von Leitungsentscheidungen zur Fixierung von Entwicklungsrichtungen und -etappen im Prozeß der Verbesserung der derzeitigen Bohrtechnik.

Gleichzeitig sind für die Erarbeitung von Realisierungsvarianten einige bergbautechnische Gesichtspunkte zu beachten, die nachfolgend kurz erläutert werden.

1. Die Realisierung der Lafettenparallelführung ist im Bereich des Einbruches eine zu erfüllende Forderung, die aus dem angestrebten Abschlagwirkungsgrad in Verbindung mit sprengtechnischen Gesichtspunkten erwächst.
2. Eine Abbohrung des gesamten Abschlages mit parallelgeführter Lafette ist besonders im Randbereich des Bohrschemas nicht immer möglich.
3. Im Grubenbetrieb kann nicht von einer stets gleichbleibenden Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene ausgegangen werden.
4. Es ist mit zufälligen Einflußgrößen zu rechnen, die eine Modellierung des Gesamtprozesses zur Vorausberechnung aller Bewegungen unmöglich machen.
5. Die Verwendung eines Meßsystems zur dreidimensionalen Erfassung der Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene sowie zur Erfassung der Gestalt der Ortsbrust, das vom Bediener oder von Markscheidern mit einer entsprechenden Genauigkeit eingerichtet werden muß, ist aus technologischen und ökonomischen Gründen derzeit nicht möglich. Die Vorgabe des Bohrschemas als konkrete Anordnung der Bohrlöcher an einer Ortsbrust ist aber für seine Abbohrung unerläßlich. Somit besteht im technologischen Prozeß das Problem der allgemeinen Formulierung und konkreten Umsetzung des Bohrschemas, zu dessen Lösung weitere Untersuchungen notwendig sind.

Aus den Erkenntnissen der durchgeführten Messungen und Untersuchungen sind folgende Aussagen ableitbar:

1. Zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens der Lafette bei der Positionierung ist der Einsatz der Proportionalventiltechnik unumgänglich. Die Hydraulikanlage ist so zu gestalten, daß eine gleichzeitige Betätigung mehrerer Bedienelemente möglich ist.
2. Für die Verminderung des Einflusses von Biegung, Torsion und Spiel auf die Positionierung sind am Bohrwagen konstruktive Veränderungen vor allem im Kreuzgelenkbereich zu realisieren.
Zur Reduzierung der Anzahl der notwendigen Sensoren und damit zur Verringerung des Programmieraufwandes ist eine Überprüfung des notwendigen Freiheitsgrades sinnvoll.
3. Aus den Untersuchungen zur gesteuerten Parallelführung ist auf Grund der festgestellten Abweichungen von Modellierungs- und Messungsergebnissen zu schlußfolgern, daß eine Lafettenparallelführung nur durch Regelkreise realisierbar ist. Auch bei weiterer Modellverbesserung sind nicht alle Einflüsse erfaßbar, sodaß ein reiner Steuerungsalgorithmus nicht anwendbar ist.
4. Zur Realisierung einer geregelten Lafettenparallelführung ist die Durchsetzung eines Bordrechnerkonzeptes erforderlich. Dabei ist die Verwendung eines einzigen CPU-Schaltkreises U 880 als Steuerrechner auf Grund der Geschwindigkeitsforderungen der Regelung und der vielfältigen Steuerungsaufgaben wahrscheinlich nicht ausreichend.
5. Bei Vorgabe des Bohrschemas in der Bohrebene ist die Berechnung der Gelenkstellungen für den nächsten Bohrpunkt unter Berücksichtigung der Bezugsstellung bzw. der aktuellen Gelenkstellung während des Bohrprozesses vorzunehmen. Eine Vorausberechnung der Gelenkstellungen ist nur bei bekannter Bohrwagenlage zur Bohrebene möglich.

Bei der technologischen Einbindung sind folgende Probleme zu beachten:

Für eine Positionierung der Lafette auf der Ortsbrust ist die Erfassung der Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene notwendig, da die Antriebsansteuerung in Gelenk- bzw. Bohrwagenkoordinaten erfolgt. Bei Handbetrieb realisiert dies der Bediener, der gemäß der visuellen Beobachtung die jeweiligen Bedienelemente betätigt und somit den Regelkreis zur Positionierung schließt.

Bei der automatischen Positionierung sind dazu entsprechende Sensoren oder Vorgaben erforderlich. Kann von einer gleichbleibenden Position und Richtung des Großloches zur Bohrebene und im Bohrschema ausgegangen werden, so ist die Erfassung der Großlochlage und -richtung zur Beschreibung der Lage des Bohrschemas ausreichend. Dies ist in der Praxis jedoch meist nicht der Fall, sodaß außer dem Großloch noch die Lage der Bohrebene bestimmt werden muß. Daraus ergibt sich, daß eine Handsteuerung der Antriebe unbedingt erforderlich ist.

Da die Lage einer Ebene im Raum durch drei Ebenenpunkte eindeutig in einem Koordinatensystem definiert ist, kann die Bohrebenenlage durch Anfahren von drei Punkten bezüglich des Bohrwagenkoordinatensystems durch Auswertung der jeweiligen Gelenkstellungen berechnet werden. Daraus sind dann die für die einzelnen Bohrpositionen notwendigen Gelenkstellungen berechenbar (/17/). Diese Punkte müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- ihre Entfernung soll möglichst groß sein, damit die erforderliche Genauigkeit der Lagebestimmung erreicht wird
- ihre Lage muß im "allgemeinen Bohrschema", welches im Bordrechner abgespeichert ist, bekannt sein. Für das jeweilige Bohrschema sind also immer die selben Punkte anzufahren, deren tatsächliche Position dann vermessen wird.

Dieser theoretischen Betrachtung stehen folgende praktische Gegebenheiten gegenüber:

- Die Ortsbrust ist keine Ebene im mathematischen Sinn.
- Das Anfahren weit entfernter Meßpunkte erfordert zusätzliche Zeit.
- Die Fixierung der Meßpunkte ist vom Bohrwagenfahrer mit der entsprechenden Genauigkeit durchzuführen.

Ausgehend von den Erkenntnissen in /60/ und unter Berücksichtigung aller aufgezeigten Faktoren wird die Entwicklung eines Bohrwagens vorgeschlagen, der folgende Betriebsarten besitzt:

1. Handpositionierung

Sie ist für die unabhängige Betätigung aller Antriebe zum Einstellen der Bezugsstellung (Erfassen der Großlochrichtung) sowie zum Anfahren der Positionen, in denen nicht parallel gebohrt werden soll, erforderlich.

2. Handpositionierung mit geregelter Parallelführung

Sie dient der Lafettenparallelführung aus einer Bezugsstellung zur Unterstützung der einfachen Handpositionierung sowie zum parallelen Anfahren von Bohrpositionen, die von der Automatik nicht erfaßt werden.

3. Automatikpositionierung

Es erfolgt die automatische Abbohrung der Löcher des Einbruches nach wählbarem Schema bei Parallelführung der Lafette zur Bezugsstellung. Dabei wird davon ausgegangen, daß Stoß, First und Sohle keine Behinderung in der Positionierung darstellen. Somit kann auf eine Streckenprofilerfassung verzichtet werden.

Nachfolgend wird die vorgeschlagene Variante anhand des Blockschaltbildes in Abbildung 21 näher erläutert.

Der Zentralrechner führt die gesamte Ablaufsteuerung, Bedienelementeabfrage und Berechnung von Sollwerten durch. Zur Geschwindigkeitserhöhung werden sogenannte Achsrechner (Co-Prozessoren) eingeführt. Sie erfüllen folgende Aufgaben:

- Realisierung der Regelung der Antriebe

Von einem Co- Prozessor werden ein oder mehrere Antriebe entsprechend der Sollwertvorgabe des Zentralrechners geregelt. Die Prozessoranzahl hängt von der konkreten kinematischen Struktur ab. Die Trennung von horizontaler und vertikaler Parallelführung und deren Zuordnung zu Einzelprozessoren nach /60/ ist nicht für alle kinematischen Strukturen möglich.

- Durchführung von Koordinatentransformationen

Besonders die Rücktransformation ist durch die Iterationsverfahren ein zeitaufwendiger Prozeß. Deshalb ist der Einsatz eines eigenständigen Prozessors, eventuell eines Arithmetikprozessors, vorteilhaft.

- Abfrage der Sicherheitseinrichtungen

Es wird eine Kontrolle von Arbeitsraum, Kabel- und Schlauchbrüchen usw. gewährleistet und eine entsprechende Reaktion im Fehlerfall ausgelöst. In Abhängigkeit von der Größe des kinematischen Systems können diese Aufgaben ggf. vom Zentralrechner mit übernommen werden. Neben der Bearbeitung sicherheitstechnischer Probleme durch den Rechner ist für eventuelle Systemabstürze des Rechners der Einsatz entsprechender Hardwarekomponenten erforderlich.

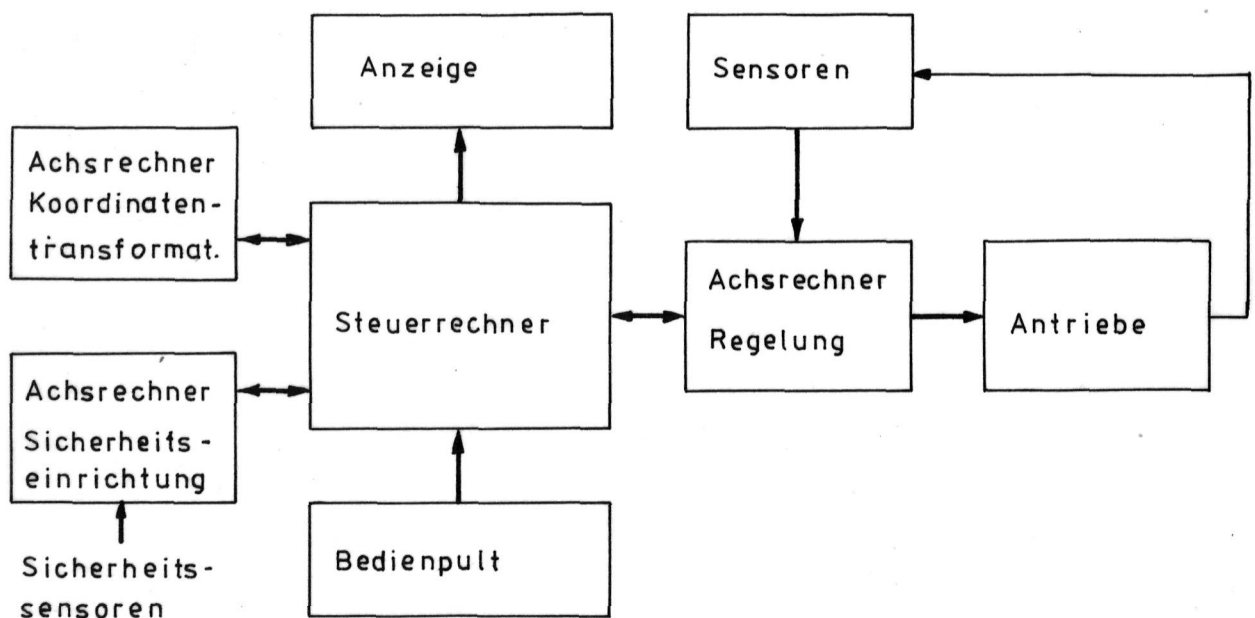


Abbildung 21: Blockschaltbild der vorgeschlagenen Variante

Zur Regelung der Antriebe durch die Achsrechner ist der Direktzugriff auf die jeweiligen Sensoren zur Istwerterfassung notwendig. Die Übernahme der Sensorwerte in den Steuerrechner ist zur Sollwertberechnung ebenfalls erforderlich. Dies erfolgt entweder über den Achsrechner oder durch Parallelzugriff. Bei Parallelzugriff ist eine höhere Geschwindigkeit der Regelung möglich.

Die vom Zentralrechner angesteuerte Anzeige ist den konkreten Erfordernissen anzupassen und dient der Übergabe von Informationen (Bohrschema, Bohrlochnummer,...) an den Bediener.

Das Bedienpult enthält sowohl die Steuerhebel zur Handbedienung als auch Funktionstasten zur Realisierung des Automatikbetriebes.

Soll durch die vorgeschlagene Variante unter Berücksichtigung bergbautechnischer Bedingungen nur den Einbruch automatisch parallelgeführt abgebohrt werden, wird folgende technologische Reihenfolge nach dem Aufstellen des Bohrwagens vorgeschlagen:

- Positionieren der Lafette auf ein Großloch zum Erfassen von dessen Lage und Orientierung
- Fixierung und Abspeicherung der Gelenkstellungen im Bordrechner
- Berechnung der Lage des 1. Bohrloches, Positionierung der Lafette und Abbohren des 1. Loches mit Hilfe des Bordrechners
- Berechnung des nächsten Loches während des Bohrens
- Positionierung und Abbohren, bis der Einbruch fertig gebohrt ist
- Fertigmeldung und Steuerungsübergabe an den Bediener
- Positionierung und Abbohrung der weiteren Löcher mit Handbedienung bzw. Handpositionierung mit geregelter Parallelführung

Zur Erhöhung der Genauigkeit der Erfassung der Großlochrichtung ist die Einführung verbesserter Einrichthilfen erforderlich.

Aus den Bedingungen im technologischen Prozeß muß entschieden werden, ob die Bohrwagenaufstellung gegenüber der Bohrebene im allgemeinen genügend genau ist, ob eine Lageerfassung über drei Ebenenpunkte ausreicht oder ob weitere Sensoren erforderlich sind.

Die Erarbeitung von Bohrschematas, ihre Systematisierung und Abspeicherung im Bordrechner ist ein noch getrennt zu bearbeitendes Problem. Die Art der Erfassung hängt von den Gesetzmäßigkeiten ab, die die Lochanordnung bestimmen:

1. Die einfachste Möglichkeit ergibt sich, wenn die Löcher in z_0 - und/ oder y_0 - Richtung bezüglich des Bohrwagenkoordinatensystems äquidistant sein sollen.
Damit ist die Abspeicherung der jeweiligen Abstände (Vorgaben) pro Bohrschema ausreichend.
2. Ist die Position eines Bohrloches eindeutig aus der Bezugsposition oder der Lage des vorhergehenden Bohrloches berechenbar, kann die Errechnung während des Abbohrens erfolgen und eine Positionsabspeicherung nicht notwendig.
3. Sind die Bedingungen 1 und 2 nicht zutreffend, müssen die Einzelpositionen in y_0 - z_0 - Koordinaten des Bohrwagenkoordinatensystems für jedes Bohrschema abgespeichert werden. Das ist für den notwendigen Speicherplatz zu berücksichtigen.

Endgültige Aussagen zu den zu verwendenden Mikrorechnerbausteinen sind an dieser Stelle nicht möglich, weil sie vom notwendigen Speicherplatz und der zu erreichenden Geschwindigkeit des Positionierungsvorganges abhängen. Während der Speicherplatzbedarf vom kinematischen System, den verwendeten Sensoren und den Gesamtaufgaben der Steuerung abhängt, wird die zu erreichende Geschwindigkeit außerdem von der notwendigen Regelgeschwindigkeit bestimmt. Der adressierbare Speicherbereich von 64 kbyte bei einem 8-bit-Prozessor ist sicherlich ausreichend, zumal durch Bankumschaltungen

Speichererweiterungen möglich sind. 1 k Byte RAM zur Zwischenspeicherung aktueller Werte ist ebenfalls als ausreichend anzusehen, wobei der Zugriff sowohl vom Zentralrechner als auch von den Achsrechnern möglich sein muß. Als Zentralrechnerbausteine sind demnach der U 880/ Z 80 bzw. bei höheren Geschwindigkeiten der U 8000 einzusetzen. Als Co-Prozessor für die Transformationen ist ein U 8032 oder U 8000 verwendbar. Ebenfalls aus Gründen der Geschwindigkeitserhöhung sowie wegen der im allgemeinen größeren Störsicherheit sind digitale Sensoren zur Positionserfassung den analogen Sensoren vorzuziehen. Erlauben diese Geber eine absolute Ausgabe der Gelenkstellungen, ist die Einstellung der Grundposition aller Gelenke zur Gebernulldpunktfixierung nicht notwendig. Die Entscheidung, ob die Bestimmung der Gelenkkoordinaten aus einer direkten Winkelmessung oder durch Umrechnung aus der Zylinderausfahrlänge zu bestimmen ist, ist aus der Gelenkanordnung zu treffen. Da die durchzuführenden Koordinatentransformationen auf den Gelenkwinkeln basieren, ist mit der direkten Winkelmessung eine höhere Geschwindigkeit erreichbar. .

Die Ausfahrlängenmessung der Lafette mit einer Genauigkeit von ± 5 mm ist ausreichend.

Beim Andrücken der Lafette an die Ortsbrust kommt es zu Richtungsabweichungen der Lafette. Sollten diese von großem Einfluß sein, so ist zur Schaffung definierter Andruckverhältnisse ein entsprechender Sensor erforderlich, der über den Steuerrechner ausgewertet wird.

In Auswertung der gewonnen Erkenntnisse und unter Berücksichtigung der technologischen Bedingungen sowie von Problemen der Ersatzteilkhaltung und des Services werden die folgenden Schritte für die Weiterentwicklung vorgeschlagen:

1. Konstruktive Überarbeitung des Bohrwagens im Mechanik- und Hydraulikbereich, zur Realisierung des Einsatzes von Proportionalstromregelventilen und zur Verbesserung der direkten Handsteuerung mit Kreuzgelenkhebeln

Die Neukonstruktion muß den Anforderungen an Positioniergenauigkeit, Sensoreneinsatz und einer späteren automati-

sierten Antriebsbetätigung entsprechen.

Diese Etappe dient zur Gewöhnung der Bohrwagenfahrer an die veränderten Bedienungsbedingungen und zur Umstellung der Serviceabteilungen auf die neue Technik

2. Realisierung der Handpositionierung mit geregelter Parallelführung

Sie erfordert den Einbau der Sensoren zur Positionserfassung und die Verwendung von Achsrechnern zur Regelung der Parallelführung. Ein Ausbau dieser Variante könnte die gleichzeitige Erfassung betriebstechnischer Daten (Standzeiten, Betriebszeiten, Defekte, usw.) und die Anzeige notwendiger Informationen sein.

Gleichzeitig sind in dieser Entwicklungsetappe weiterführende Untersuchungen zur Regelkreisgestaltung und zur Vorbereitung der Automatisierung des Bewegungsablaufes mit dem vorhandenen Hardwareaufbau möglich.

2. Einführung des automatischen Abbohrens des Einbruches.

Der Umfang der gegenüber der zweiten Etappe zusätzlich einzufügenden Hard- und Softwarekomponenten hängt von den Untersuchungsergebnissen bei der Nutzung in dieser Entwicklungsstufe ab.

Das Erreichen dieser Entwicklungsstufe ist nach den vorliegenden Erkenntnissen mit einem vertretbaren Nutzen- Aufwand-Verhältnis verbunden. Eine darüberhinausgehende Erhöhung des Automatisierungsgrades ist nur zu rechtfertigen, wenn tiefergehende Untersuchungen zu den bergbautechnischen, technologischen und ökonomischen Bedingungen dies befürworten.

6. Zusammenfassung

=====

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung des Positionierungsverhaltens der Bohrlafette von Sprenglochbohrwagen zur Antriebssteuerung sowie der Untersuchung der Möglichkeiten der Automatisierung des Bohrprozesses.

Ausgehend von der Analyse des technischen Standes der Bohrwagenentwicklung werden die Problemstellungen genannt und der Lösungsweg herausgearbeitet.

Als Methode zur Untersuchung von Positionierungsvorgängen wurde die Simulation gewählt. Zur Berücksichtigung vielfältiger Einflußgrößen wird die Bedeutung der Einbeziehung von Meßergebnissen in die Modellierung nachgewiesen.

Einen Hauptteil der Arbeit bildet die Schaffung von Modellen, die durch den Vergleich mit Meßwerten bewertet werden.

Ein wichtiges Ergebnis ist die Formulierung der Parallelitätsbedingung für die Lafettenpositionierung. Es kann nachgewiesen werden, daß die aus der Parallelitätsbedingung ermittelten Beziehungen zwischen den einzelnen Gelenkkoordinaten von der jeweiligen Lafettenposition abhängen.

Zur Durchführung der Messungen wurde ein mikrorechnergesteuertes Meß- und Steuersystem mit entsprechenden Interfacebausteinen zur Sensordatenerfassung, Bedienpultabfrage und Hydraulikantriebsansteuerung sowie zugehöriger Software entwickelt. Es realisiert die automatische Meßwerterfassung und -anzeige sowie Abspeicherung der Meßdaten auf Diskette und die Ausgabe der Steuerspannungen an die Proportionalventilelektronik.

Mit Hilfe der Modellierung werden mehrere Varianten zur Ansteuerung der Antriebe abgeleitet und als Prinzipiellösungen sowie als konkrete Realisierungen an einem Bohrwagen beschrieben.

Durch Messungen an Bohrwagen wurde der Einfluß unterschiedlicher Ansteuerfunktionen und Reglerparameter auf das Schwing- und Positionierungsverhalten nachgewiesen. Es wird festge-

stellt, daß zur Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen an die Positionierung eine Regelung zur Lafettenparallelführung notwendig ist. Ebenso wurden mit den Messungen Grenzbeschleunigungen des Bohrarmes ermittelt, bis zu denen ein schwingungsarmer Bewegungsvorgang möglich ist.

Unter Berücksichtigung der aus den Untersuchungen sowie aus bergbautechnischen Gegebenheiten formulierten Anforderungen an einen Bohrwagen wird eine konkrete Realisierungsvariante als Vorschlag für die Weiterentwicklung vorgestellt und zu beachtende Probleme im Entwicklungsprozeß genannt.

Literaturverzeichnis

-
- /1/ Arbeitspapier zur Simulation des Bohrvorganges für den
SB 2/1 mit dem Ziel der Parallelführung der Lafette /
Walter, M. - 1986. - TH Ilmenau, Sektion INTET

 - /2/ Antriebssimulation für Sprenglochbohrwagen /
Latussek, P.; Walter, M. - 1988. - A4- Bericht -
VEB Bergwerksmaschinen Dietlas

 - /3/ Unterlagen zur Hard- und Software des Meßwerterfassungs-
systems und Konstruktionsunterlagen zur Sensor-
anbringung / Walter, M. - 1988. - TH Ilmenau,
Sektion INTET

 - /4/ Ergebnisse bohrtechnischer Untersuchungen beim
Herstellen von Sprenglöchern Untertage und abzuleitende
Entwicklungstendenzen / Gerhardt, H. - In: Neue Bergbau-
technik - 12. Jahrgang, Heft 1, Januar 1982 - S. 37 - 42

 - /5/ Parallelsteuerung und Diaprojektor als Einrichthilfen
für Bohrlafetten beim Streckenauffahren / Hofmeister,
W. - In: Kali und Steinsalz - April 1976 - S. 21 - 27

 - /6/ Alpenjumbo Minbo 27 PRL - 1986. - Anwenderinformationen
Böhler Pneumatik International GmbH Kapfenberg

 - /7/ Hydraulikbohrarm BUT 30. - In: Druckluftkommentare
Heft 2. - 1981. - Atlas Copco MTC GmbH Bremen

 - /8/ Ich arbeite mit einem SB 2/1 PL / Bergholz, D.;
Gotthard, K.; Pörner, G. - 1983. - VEB Kombinat Kali

 - /9/ Markscheiderische Überprüfung der elektrohydraulischen
Parallelführung des SB 2/1 PI - 1983. - VEB Bergwerks-
maschinen Dietlas

- /10/ Informationsbericht zum Stand der Arbeit im Rahmen des Forschungsvertrages "Simulation Bohrwagen SB 2/1" / Latussek, ; Walter, M. - 1987 - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /11/ Salzgitter Hydraulikbohrwagen im Baukastensystem - 1984.- Anwenderinformationen - Salzgitter Maschinen und Anlagen AG Salzgitter- Bad
- /12/ Salzgitter Bohrwagen - 1984. - Anwenderinformationen - Salzgitter Maschinen und Anlagen AG Salzgitter- Bad
- /13/ Mikroprozessorgesteuerter Bohrwagen der Salzgitter AG In: Glückauf Essen - 122. Jahrgang, Heft 13, 1986. - Seite 884
- /14/ Vollautomatischer Bohrwagen der Deutschen Montabert GmbH In: Glückauf Essen - 122. Jahrgang, Heft 11, 1986. - Seite 701
- /15/ Mit der Abbautechnik in das Computerzeitalter - In: Tamrock News - Heft 1, 1985 - Seite 20 ff.
- /16/ Frei programmierbare Manipulatoren / Blume, C.; Dillmann, R. - Vogel- Verlag, 1981
- /17/ Erweiterung des Programms zur Koordinatentransformation des Bohrwagens SB 2/1 / Hilarius, G. - 1988 - Diplomarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /18/ Hütte - Des Ingenieurs Taschenbuch. Band 1: Theoretische Grundlagen / Autorenkollektiv. - 28. neuüberarbeitete Auflage. - Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1955. -
- /19/ Betriebsdokument zum Sprenglochbohrwagen SB 2/1 - 1984. - VEB Bergwerksmaschinen Dietlas

- /20/ Betriebsdokument zum Sprenglochbohrwagen SB 2/2 - 1986. -
VEB Bergwerksmaschinen Dietlas
- /21/ Prinzipien und Methoden der Dynamik / Fischer, U.;
Stephan, W. - 1. Aufl. - Leipzig: VEB Fachbuchhandel,
1972. -
- /22/ DIMAN- Programmiersystem zur Simulation von Antrieben /
Püttmann, R.; Schelinski, U.; Seidel, E. - 1980. -
Anwenderinformation - TU Dresden
- /23/ Modellspeicher "DIMAN" / Püttmann, R. - 1979 -
TU Dresden -
- /24/ Vorbereitung der Arbeitsmöglichkeit mit "DIMAN" im
Dialogbetrieb / Vorrath, S.; Gobel, J. - 1986. -
Belegarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /25/ Erweiterung des Simulationssystems DIMAN auf Graphik-
fähigkeit und Einbindung des statischen Modells des
Bohrwagens SB 2/1 in den Blockvorrat / Gobel, J. -
1987. - Diplomarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /26/ Einbindung des Hydraulikmodells der TU Karl- Marx- Stadt
in das Simulationssystems DIMAN / Vorrath, S. - 1987. -
Diplomarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /27/ Aufbau eines Simulations- Modellbaustein- Speicher für
elektromechanische Antriebssysteme / Püttmann, R. -
1980. - A4- Bericht - TU Dresden
- /28/ Beschreibung von Modellbildungsverfahren als Beitrag
für die Simulation von elektronisch geregelten Antriebs-
systemen mit den Simulationssystemen DIWASIM und DIMAN /
Petzold, H. - 1984. - Diplomarbeit - TH Ilmenau,
Sektion INTET

- /29/ Industrieroboter Entwicklung / Volmer, J. - 1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1983 -
- /30/ Roboter in der Gerätetechnik / Bögelsack, G.; Kallenbach, E.; Linnemann, G. - 1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag, 1984. -
- /31/ Industrierobotersteuerung / Schwarz, W.; Zecha, M.; Meyer, G. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag Technik, 1985. -
- /32/ Lösung der Umkehraufgabe für den Bohrwagen SB 2/1 mittels Bürocomputer 5120 / Hilarius, G. - 1987. - Großer Beleg - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /33/ Präzisionsrobotertechnik. Band 1 - 3. Aufl. - 1983. - KdT Suhl - TH Ilmenau
- /34/ Rationelle Verfahren zur Koordinatentransformation für ausgewählte Klassen von IR / Pham Anh Tuan. - 1986. - Dissertation A - TH Ilmenau, Sektion Gerätetechnik
- /35/ Grundlagen für die Projektierung und Berechnung von Hydraulikanlagen / Blumauer, G. - 2. Aufl. - Berlin: VEB Verlag Technik - In: Reihe Automatisierungstechnik. Band 186 -
- /36/ Elektrohydraulische Servoantriebe / Wächter, R.; Littmann, K.; Kietz, S. - 1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1983. - In: Reihe Automatisierungstechnik - Band 203 -
- /37/ Lageregelungen für hydraulische Servoantriebe / Faulhaber, S. - Düsseldorf: VDI Verlag, 1985. - In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik Nr. 84 -

- /38/ Funktionseinheiten der Automatisierungstechnik /
Töpfer, H.; Kriesel, W. - 4., bearb. Aufl. - Berlin:
VEB Verlag Technik, 1977. -
- /39/ Statische Modellbildung der Regelstrecke elektro-
hydraulischer Lageregelkreise (TMO. ELHYDS Version 2.1) /
Friedrich, Ch. - 1986. - TH Karl- Marx- Stadt -
- /40/ Einführung in die Hydraulik und Pneumatik / Will, D.;
Ströhl, H. - Berlin: VEB Verlag Technik, 1981. -
- /41/ Programmierung, Simulation und Steuerung der Bewegung
von Industrierobotern / Karguth, A. - 1986. -
Dissertation A - TH Ilmenau, Sektion Gerätetechnik
- /42/ Ermittlung der Ansteuerfunktion für die entsprechenden
Wegeventile des Sprenglochbohrwagens SB 2/2 unter den
Bedingungen der Parallelführung in vertikaler Richtung
und mit Berücksichtigung von Durchbiegung / Cichon, S. -
1987. - Großer Beleg - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /43/ Untersuchung des Einflusses verschiedener
Beschleunigungsfunktionen der Antriebe auf das Weg- Zeit-
Verhalten einzelner Gelenke des Sprenglochbohrwagens SB
2/2 und Ermittlung der zugehörigen Ansteuerfunktionen
für Proportionalstromregelventile / Keil, L. - 1987. -
Großer Beleg - TH Ilmenau, Sektion INTET
- /44/ Steuerung und Regelung von Robotern - VDI- Berichte 598 -
Düsseldorf VDI- Verlag
- /45/ Realisierung einer Ansteuerung des Bohrwagens SB 2/2 zur
vertikalen Parallelführung der Lafette bei der
Positionierung / Cichon, S. - 1988. - Diplomarbeit -
TH Ilmenau, Sektion INTET

- /46/ Proportionalstromregelventile, ablaufgeregelt - 1985. - Anwenderinformationen - VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik Leipzig

- /47/ Anwendung von Mikrocomputern. Band 1: Digitale Regelung mit Mikroprozessoren / Hoffmann, N. - Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1983. -

- /48/ Wegeventile mit elektromagnetischer Betätigung Nennweite 10 Nenndruck 32 MPa - 1984. - Anwenderinformationen VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik Leipzig

- /49/ Hydraulische Arbeitszylinder - 1983. - Anwenderinformationen - VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik Leipzig

- /50/ Inkrementaler Geber rotatorisch (IGR) - 1984. - Anwenderinformationen - VEB Carl Zeiss Jena

- /51/ Schaltungsmöglichkeit zur Vierfachauswertung von Impulsen inkrementaler rotatorischer Geber / Gleichmann, L.- In: RFE - Berlin: VEB Verlag Technik, 24. Jahrgang, 1975, Heft 5 - S. 165 - 169

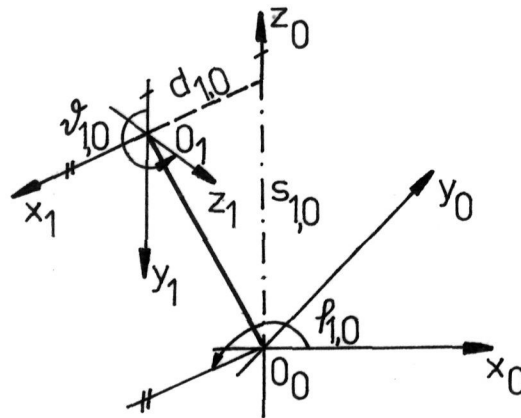
- /52/ TURBO- Pascal Nutzerhandbuch Version 3.00x / Finke, W. - 1986. - Ingenieurhochschule für Seefahrt Warnemünde

- /53/ Mikroprozessoren / Roth, M. - 6.Aufl. - 1980. - TH Ilmenau, KDT-Hochschulsektion

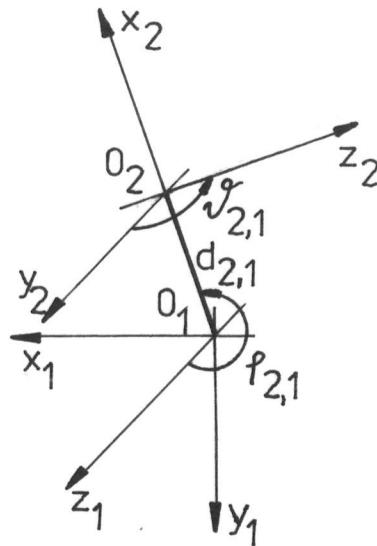
- /54/ Aufbau eines Experimentiergerätes zur Ansteuerung mehrphasiger Verbraucher über den Mikrorechner K 1520 / Walter, M. - 1983. - Diplomarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET

- /55/ Digital-Analog-Wandler DAC 32 - 1985. - Anwenderinformationen - VEB Keramische Werke Hermsdorf

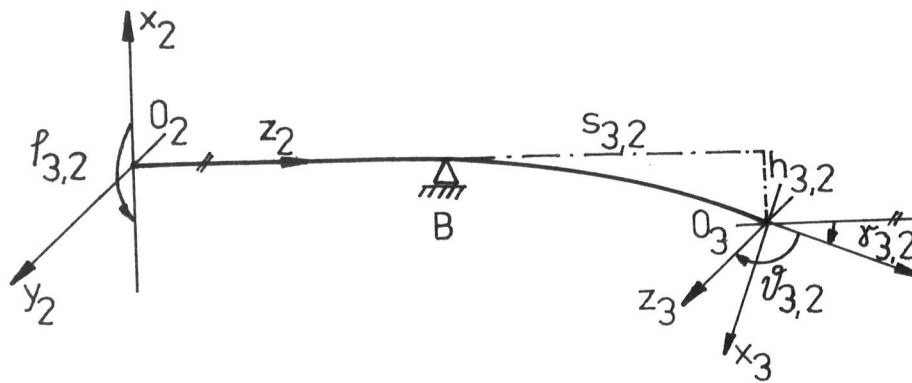
- /56/ 11 (9)- Bit Analog-Digital-Wandler für K 1520 -
1983. - Nachnutzungsunterlagen - TH Ilmenau, Sektion
TBK, Bereich BT
- /57/ HLW- Druckaufnehmer - 1984. - Anwenderinformationen -
VEB Robotron Meßelektronik - Dresden
- /58/ Wissensspeicher Mikrorechnerprogrammierung / Claßen, L.;
Öfler, U. - 2., durchgesehene Aufl. - Berlin: VEB Verlag
Technik, 1986. -
- /59/ Interaktive und halbautomatische Analyse von Bildfolgen /
Michaelis, W. - 1988. - Manuskript zur Dissertation A -
TH Ilmenau, Sektion INTET
- /60/ Konzipierung von Realisierungsvarianten zur automatischen
Steuerung des Bohrwagens / Keil, L. - 1988 -
Diplomarbeit - TH Ilmenau, Sektion INTET



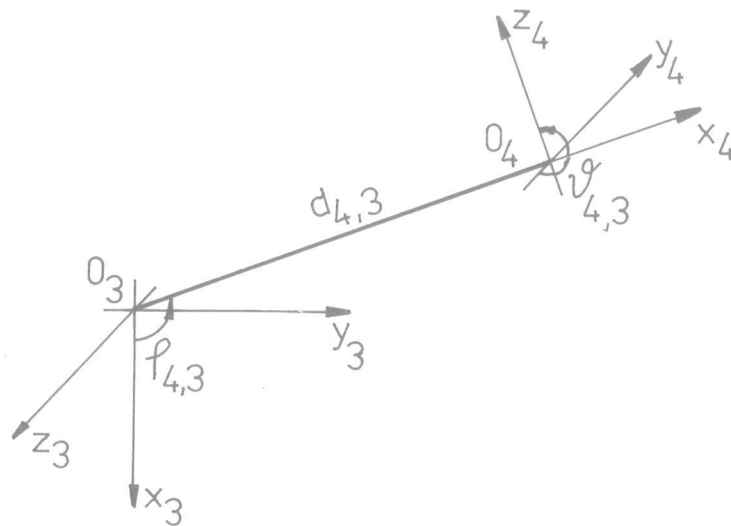
$$A_{1,0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{1,0} \cos p_{1,0} & \cos p_{1,0} & 0 & -\sin p_{1,0} \\ d_{1,0} \sin p_{1,0} & \sin p_{1,0} & 0 & \cos p_{1,0} \\ s_{1,0} & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$



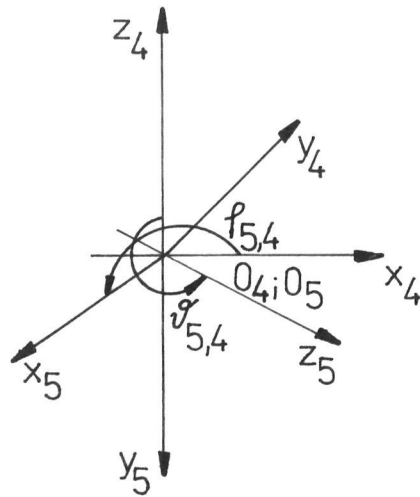
$$A_{2,1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{2,1} \cos \theta_{2,1} & \cos \theta_{2,1} & 0 & \sin \theta_{2,1} \\ d_{2,1} \sin \theta_{2,1} & \sin \theta_{2,1} & 0 & -\cos \theta_{2,1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



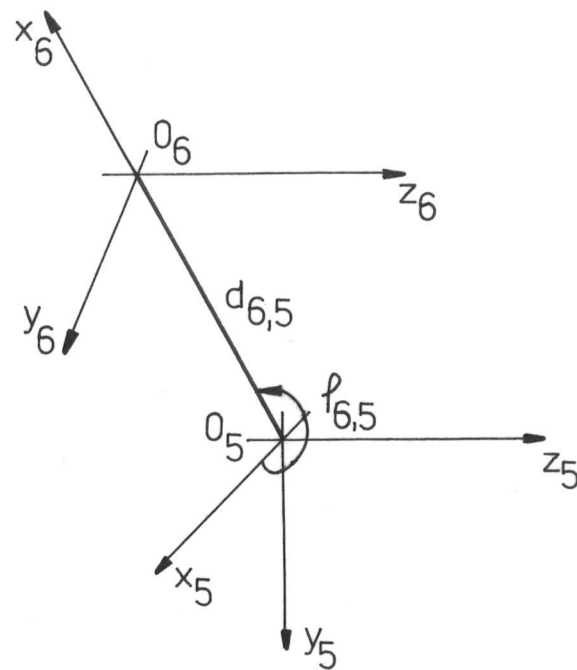
$$A_{3,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{3,2} & -\cos \delta_{3,2} & -\sin \delta_{3,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ s_{3,2} & -\sin \delta_{3,2} & \cos \delta_{3,2} & 0 \end{pmatrix}$$



$$A_{4,3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{4,3} \cos l_{4,3} & \cos l_{4,3} & 0 & -\sin l_{4,3} \\ d_{4,3} \sin l_{4,3} & \sin l_{4,3} & 0 & \cos l_{4,3} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

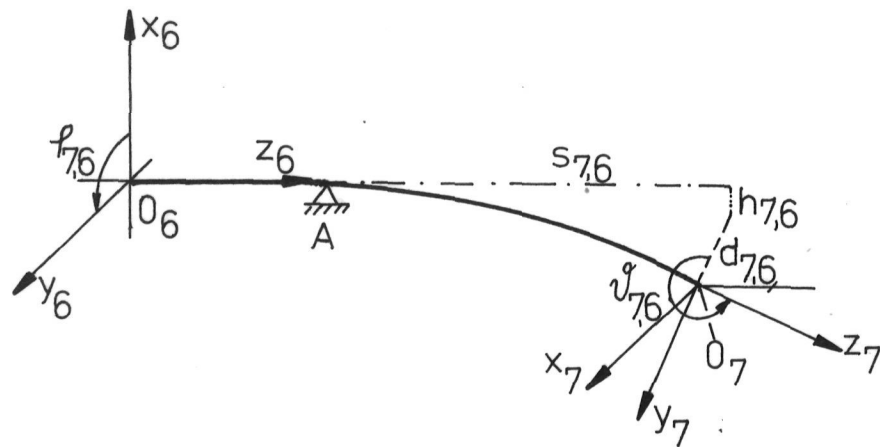


$$A_{5,4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos l_{5,4} & 0 & -\sin l_{5,4} \\ 0 & \sin l_{5,4} & 0 & \cos l_{5,4} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

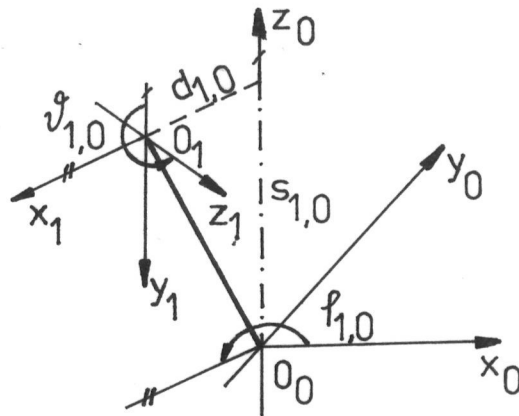


$$A_{6,5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{6,5} \cos l_{6,5} & \cos l_{6,5} & -\sin l_{6,5} & 0 \\ d_{6,5} \sin l_{6,5} & \sin l_{6,5} & \cos l_{6,5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

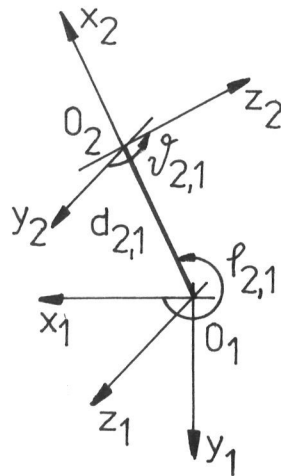
Anlage 1-7



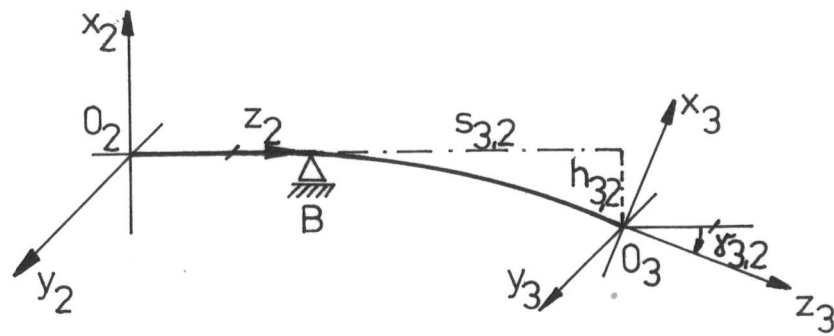
$$A_{7,6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{7,6} & 0 & -\cos \vartheta_{7,6} & \sin \vartheta_{7,6} \\ d_{7,6} & 1 & 0 & 0 \\ s_{7,6} & 0 & \sin \vartheta_{7,6} & \cos \vartheta_{7,6} \end{pmatrix}$$



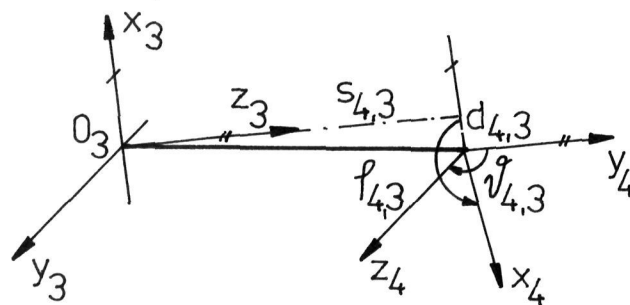
$$A_{1,0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{1,0} \cos \phi_{1,0} & \cos \phi_{1,0} & 0 & -\sin \phi_{1,0} \\ d_{1,0} \sin \phi_{1,0} & \sin \phi_{1,0} & 0 & \cos \phi_{1,0} \\ s_{1,0} & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$



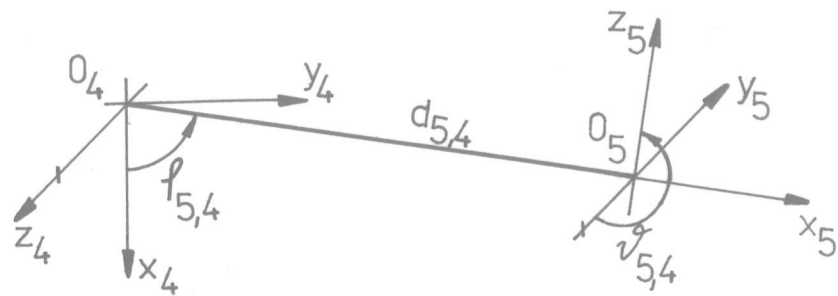
$$A_{2,1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{2,1} \cos l_{2,1} & \cos l_{2,1} & 0 & \sin l_{2,1} \\ d_{2,1} \sin l_{2,1} & \sin l_{2,1} & 0 & -\cos l_{2,1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



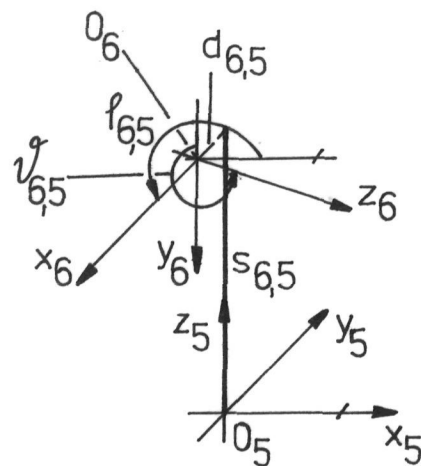
$$A_{3,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{3,2} & \cos \gamma_{3,2} & 0 & -\sin \gamma_{3,2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s_{3,2} & \sin \gamma_{3,2} & 0 & \cos \gamma_{3,2} \end{pmatrix}$$



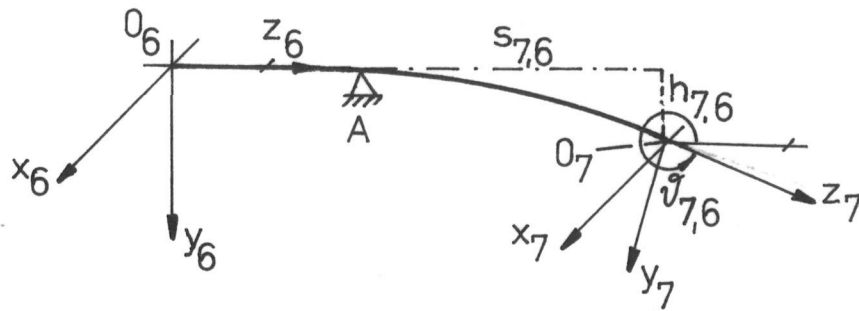
$$A_{4,3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{4,3} \cos \phi_{4,3} & \cos \phi_{4,3} & 0 & \sin \phi_{4,3} \\ d_{4,3} \sin \phi_{4,3} & \sin \phi_{4,3} & 0 & -\cos \phi_{4,3} \\ s_{4,3} & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



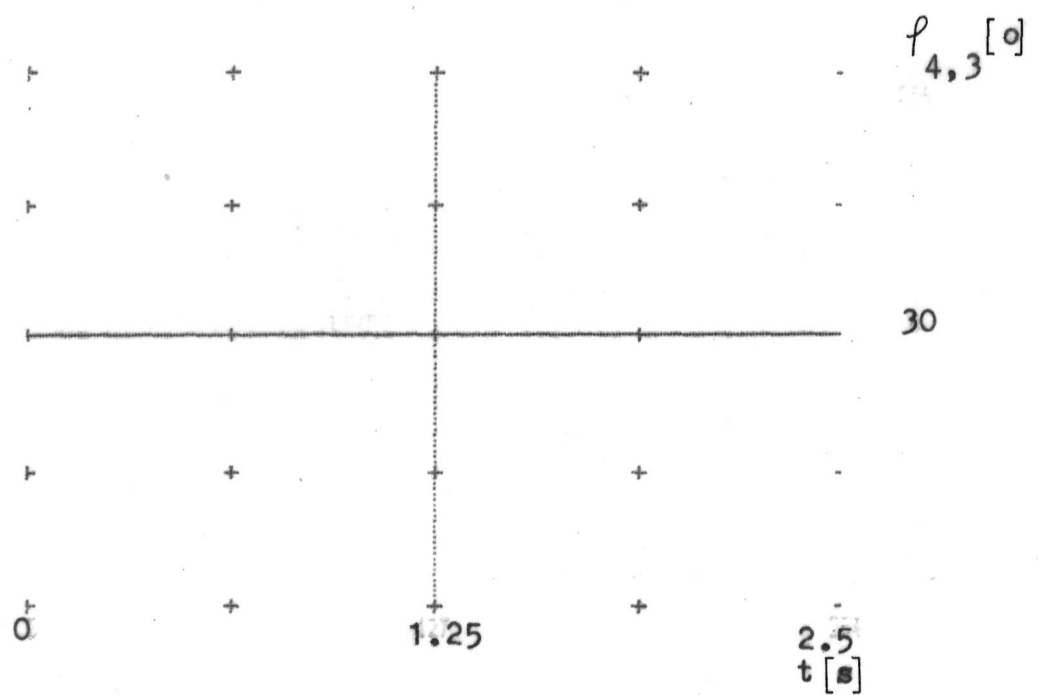
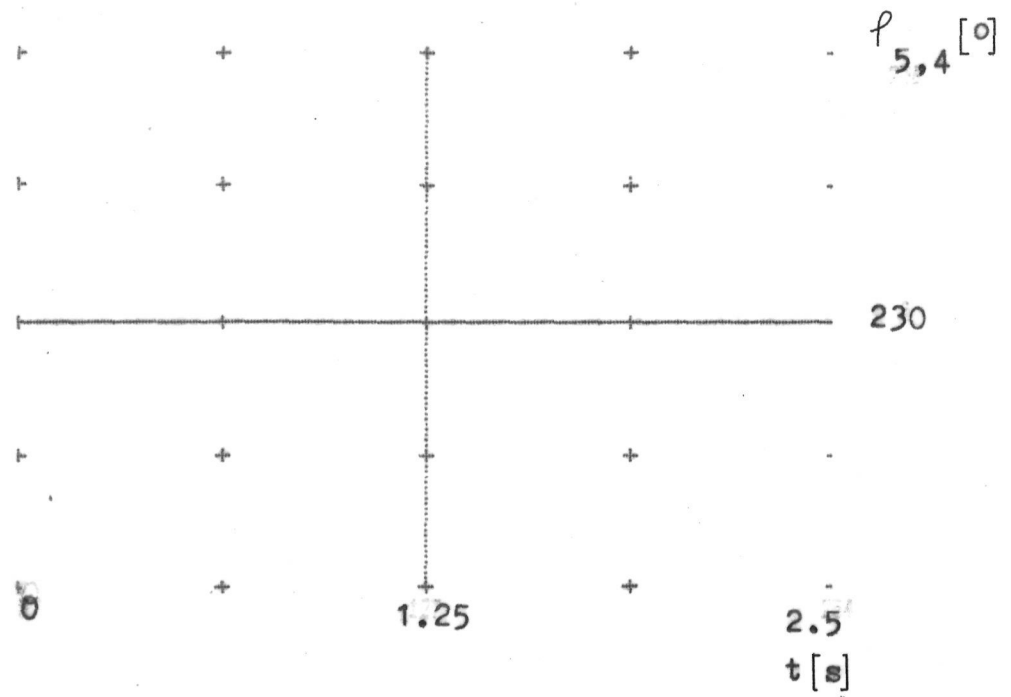
$$A_{5,4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{5,4} \cos l_{5,4} & \cos l_{5,4} & 0 & -\sin l_{5,4} \\ d_{5,4} \sin l_{5,4} & \sin l_{5,4} & 0 & \cos l_{5,4} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$



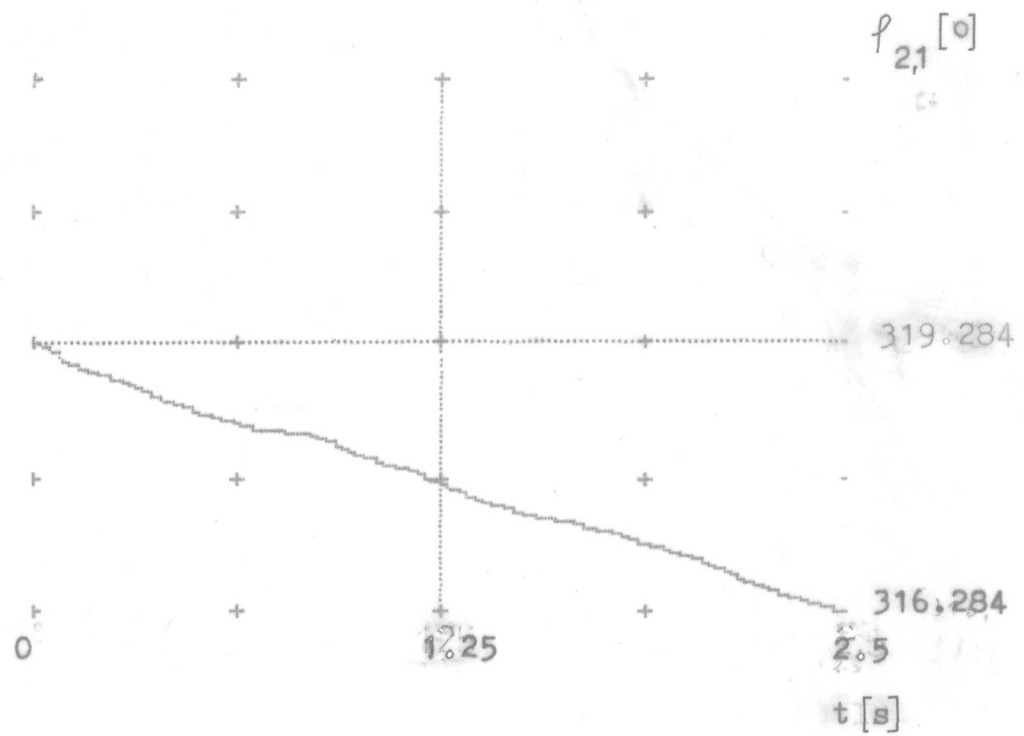
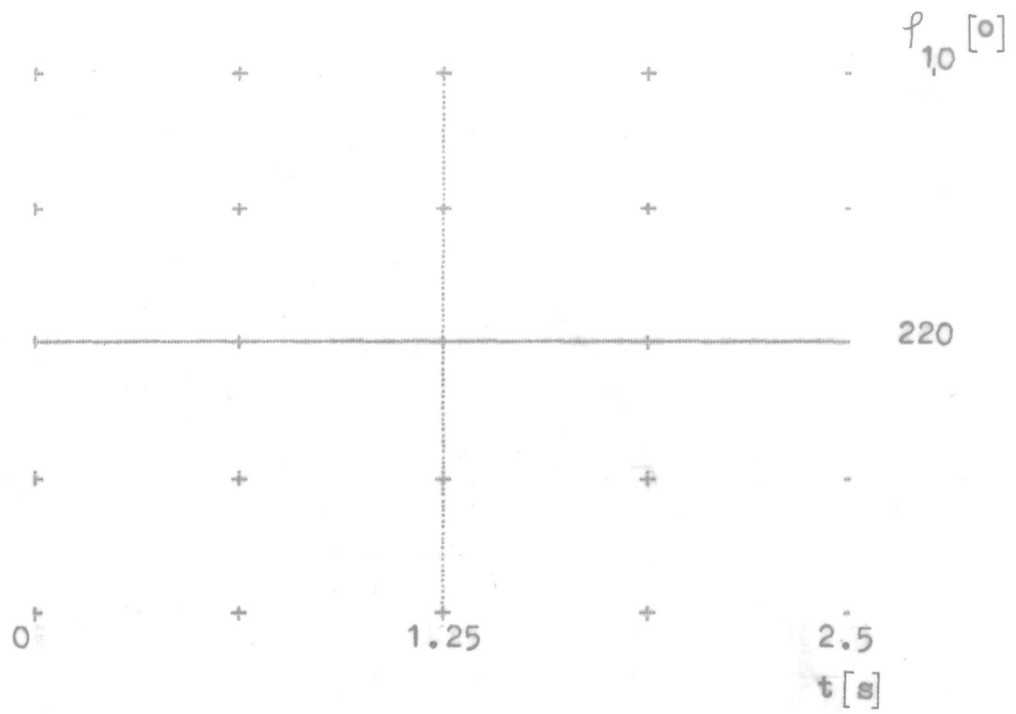
$$A_{6,5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ d_{6,5} \cos l_{6,5} & \cos l_{6,5} & 0 & -\sin l_{6,5} \\ d_{6,5} \sin l_{6,5} & \sin l_{6,5} & 0 & \cos l_{6,5} \\ s_{6,5} & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

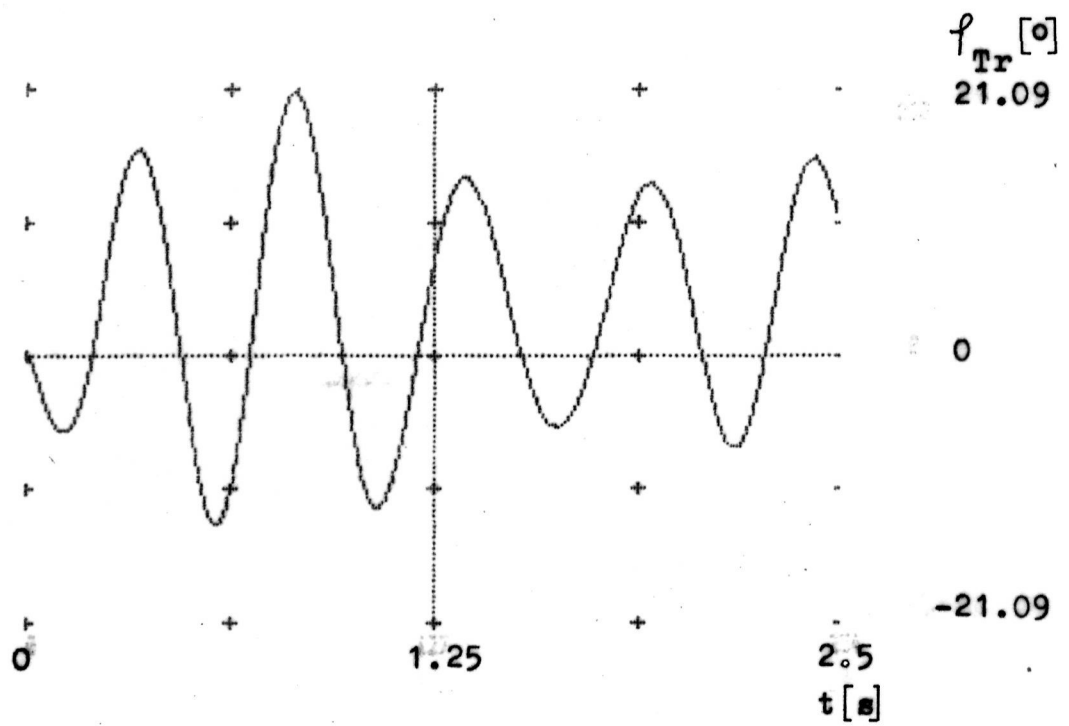
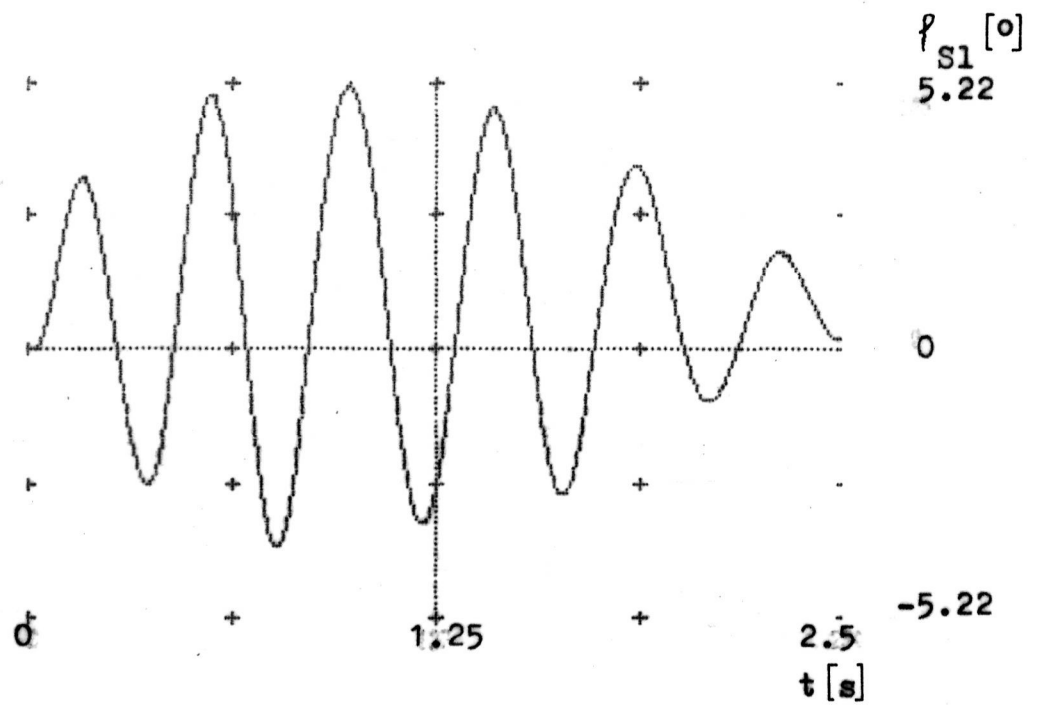


$$A_{7,6} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ h_{7,6} & 0 & \cos v_{7,6} & -\sin v_{7,6} \\ s_{7,6} & 0 & \sin v_{7,6} & \cos v_{7,6} \end{pmatrix}$$

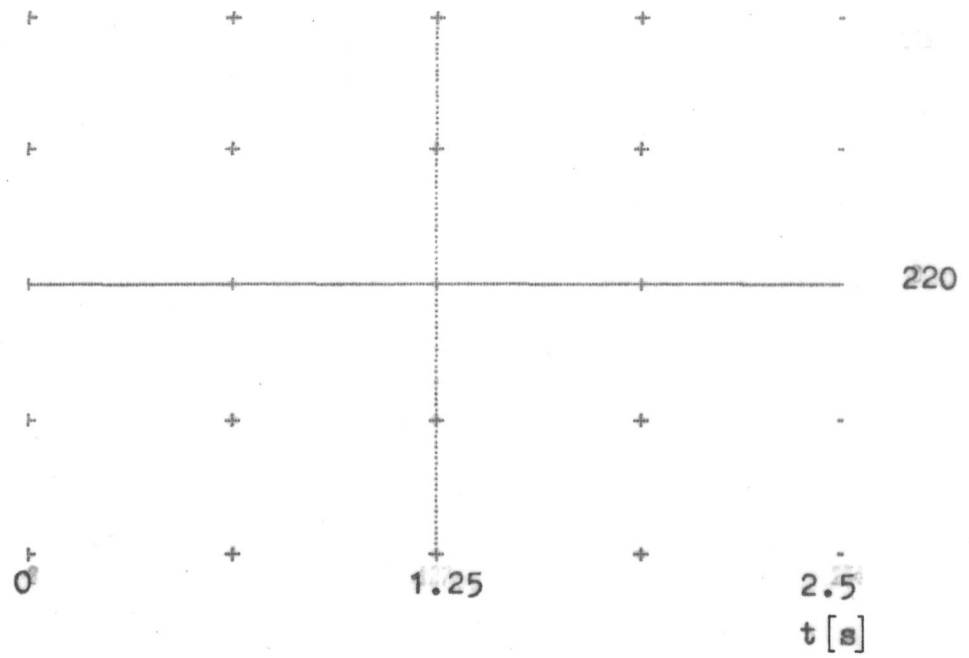


Anlage 3 - 1

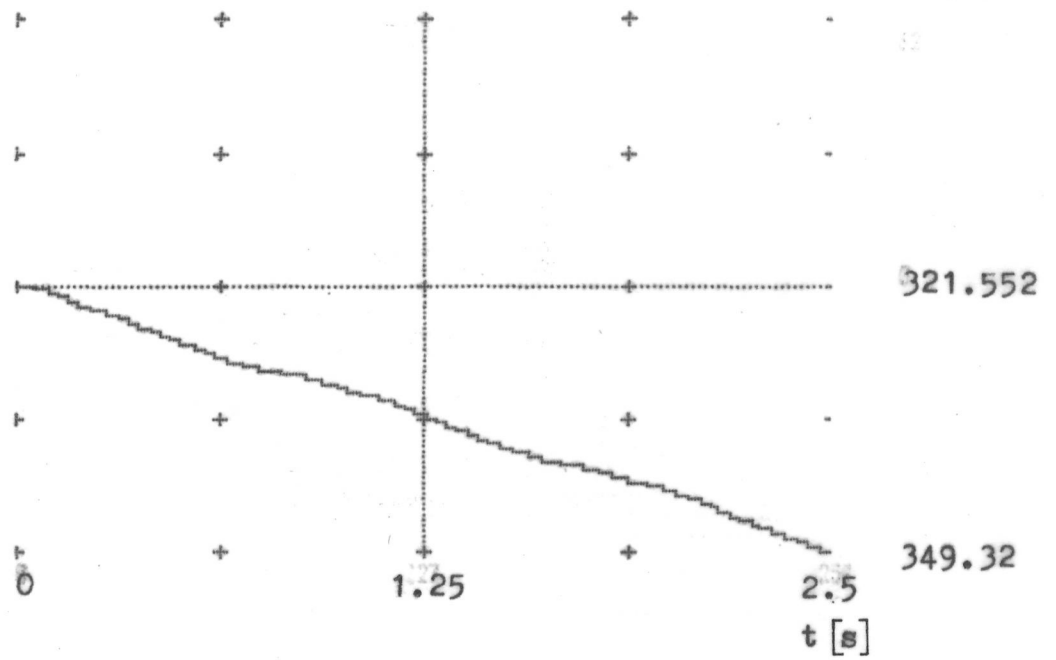




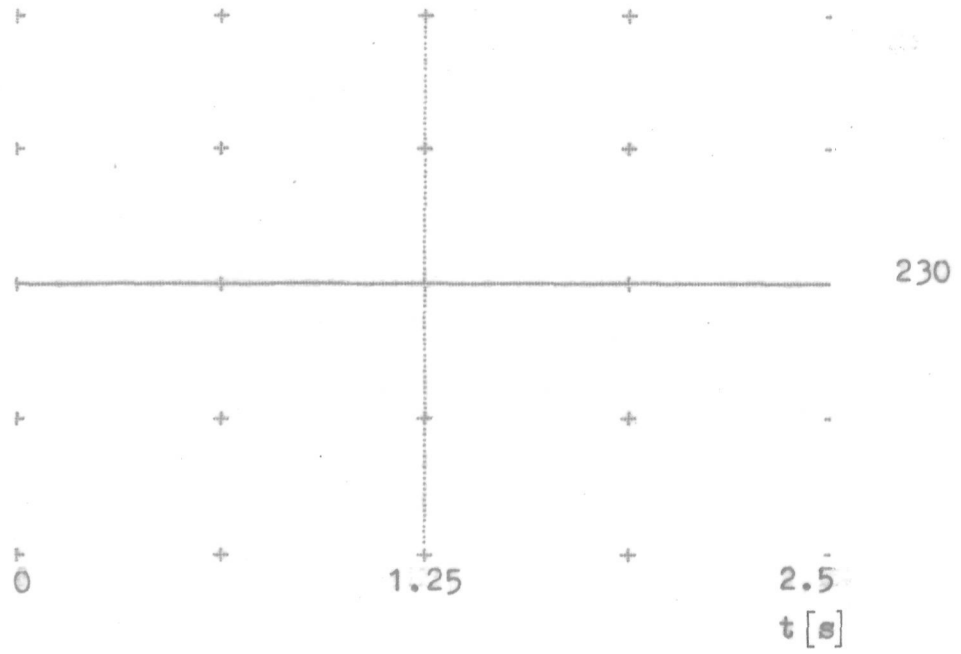
$\varphi_{1,0} [^\circ]$



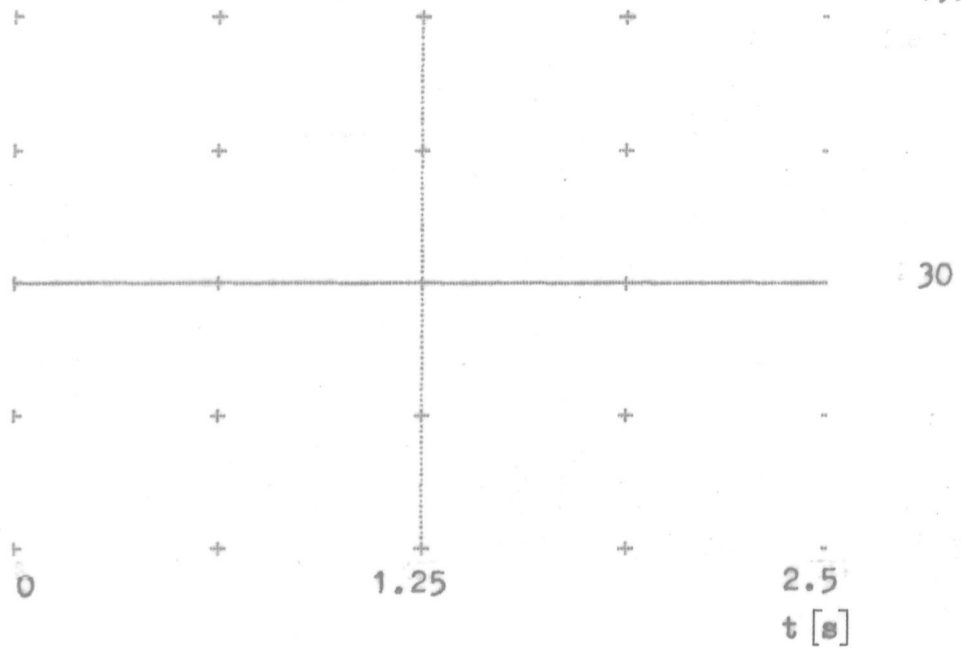
$\varphi_{2,1} [^\circ]$

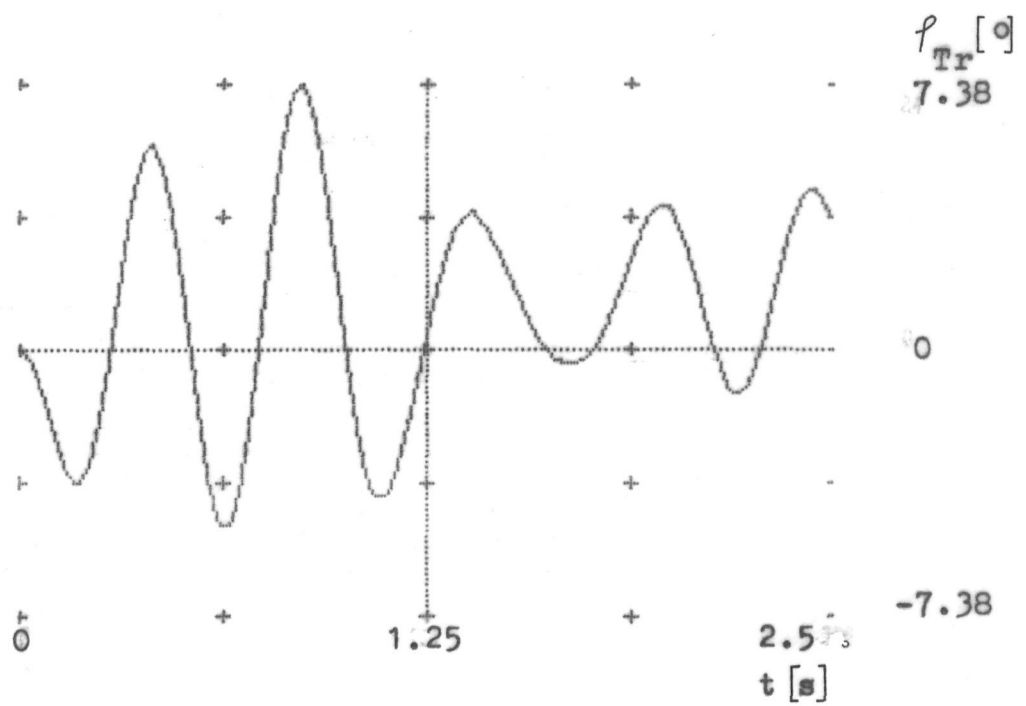
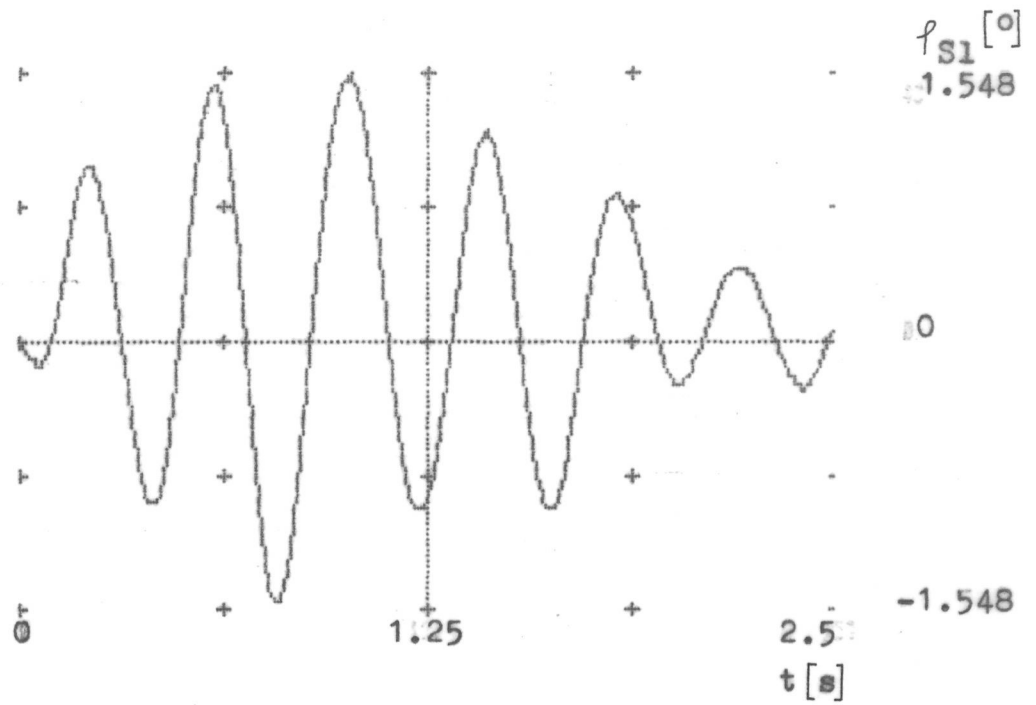


$\varphi_{5,4} [^\circ]$

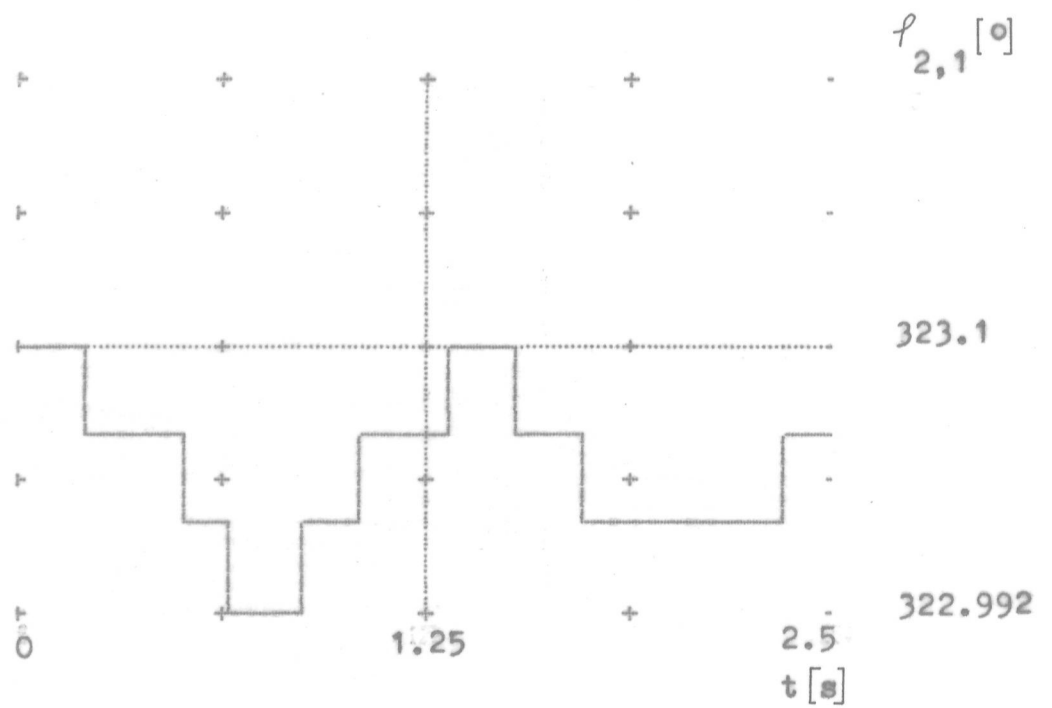
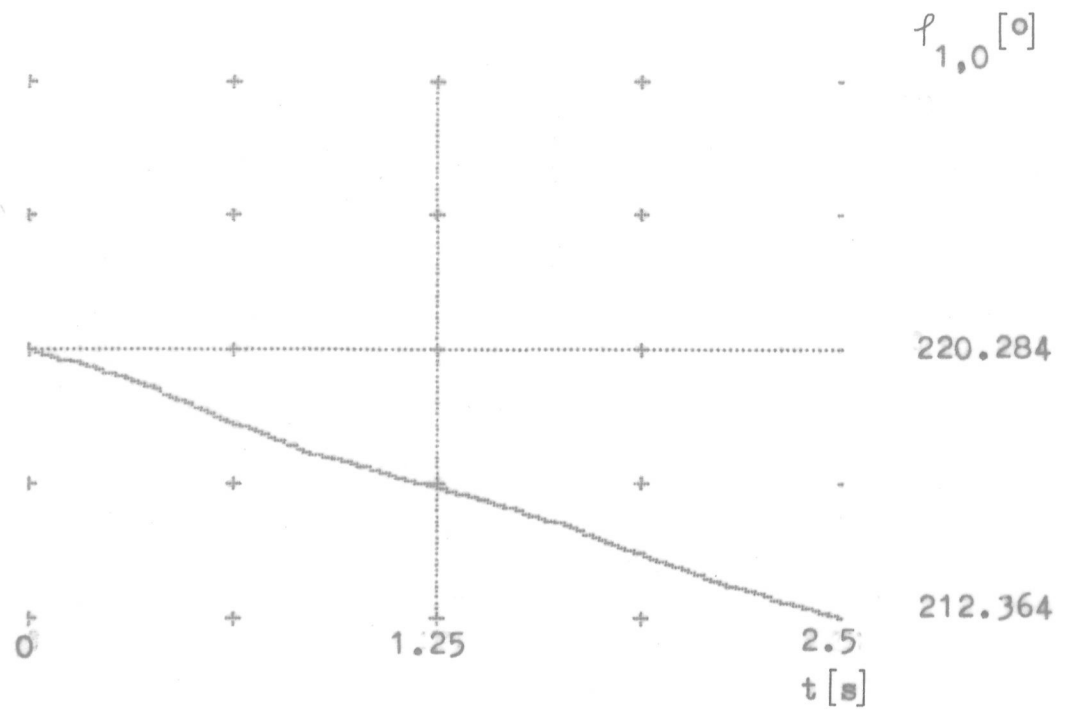


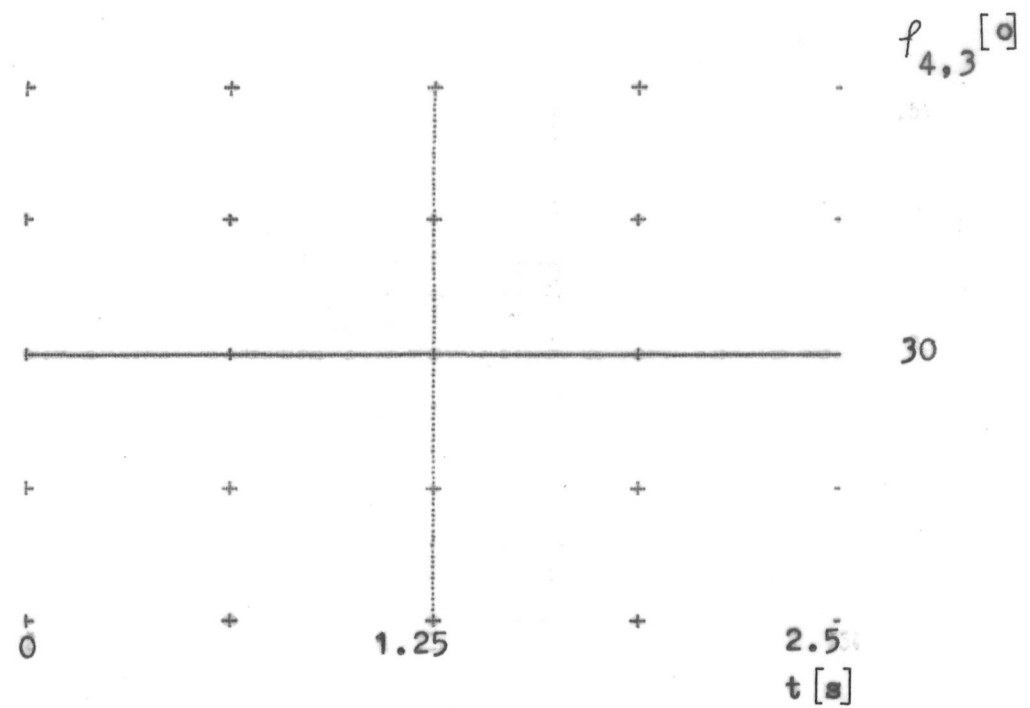
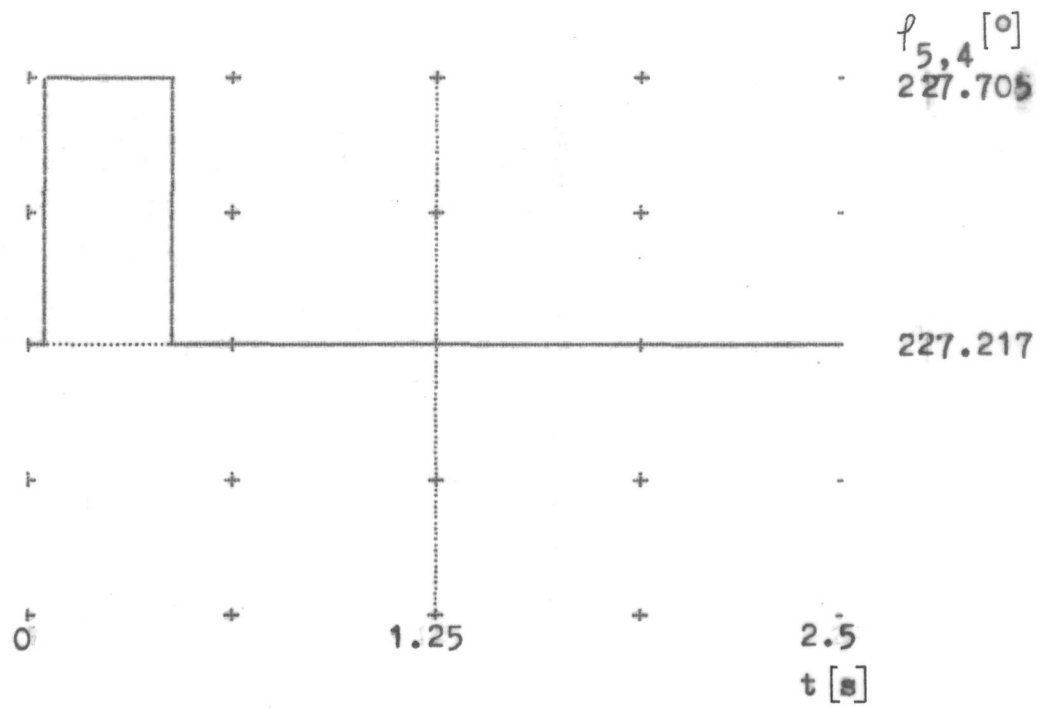
$\varphi_{4,3} [^\circ]$

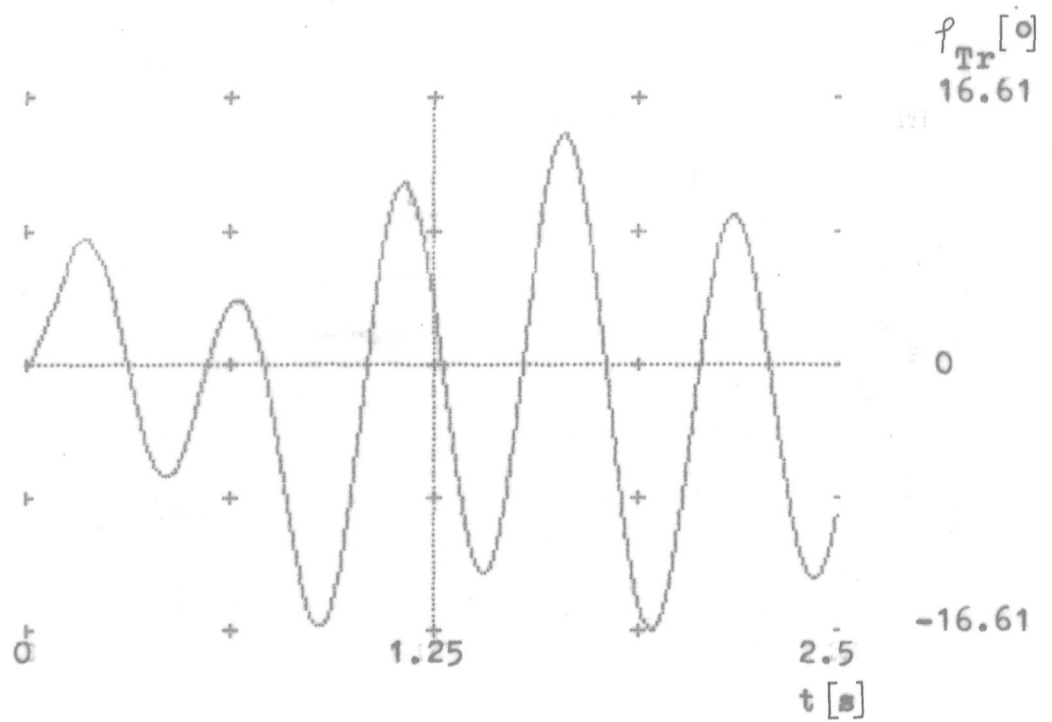
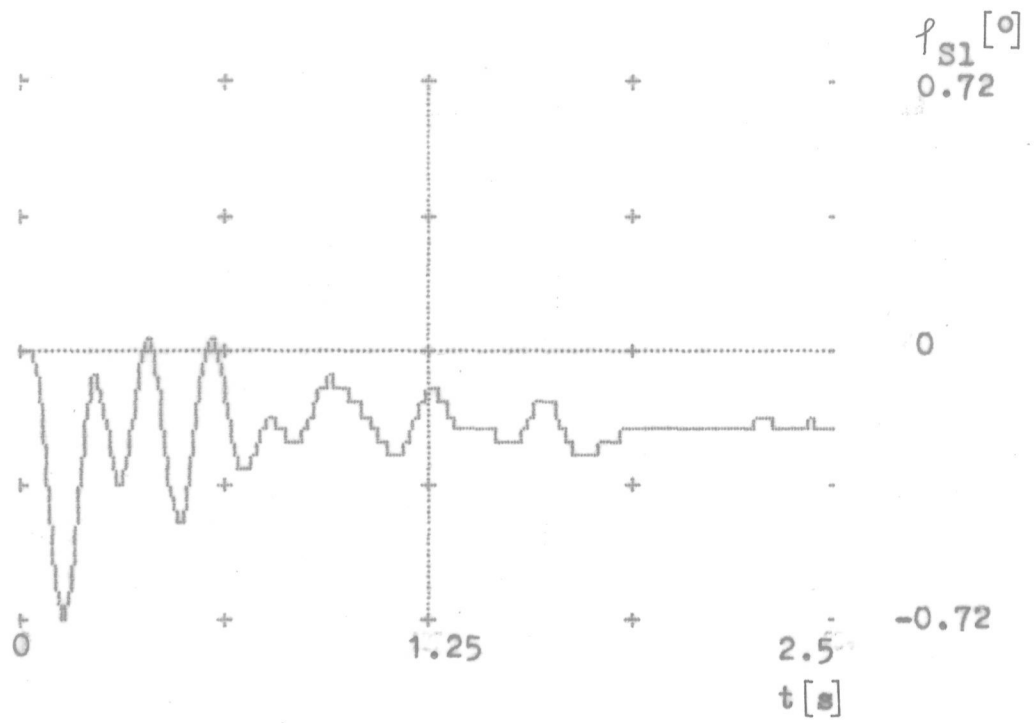




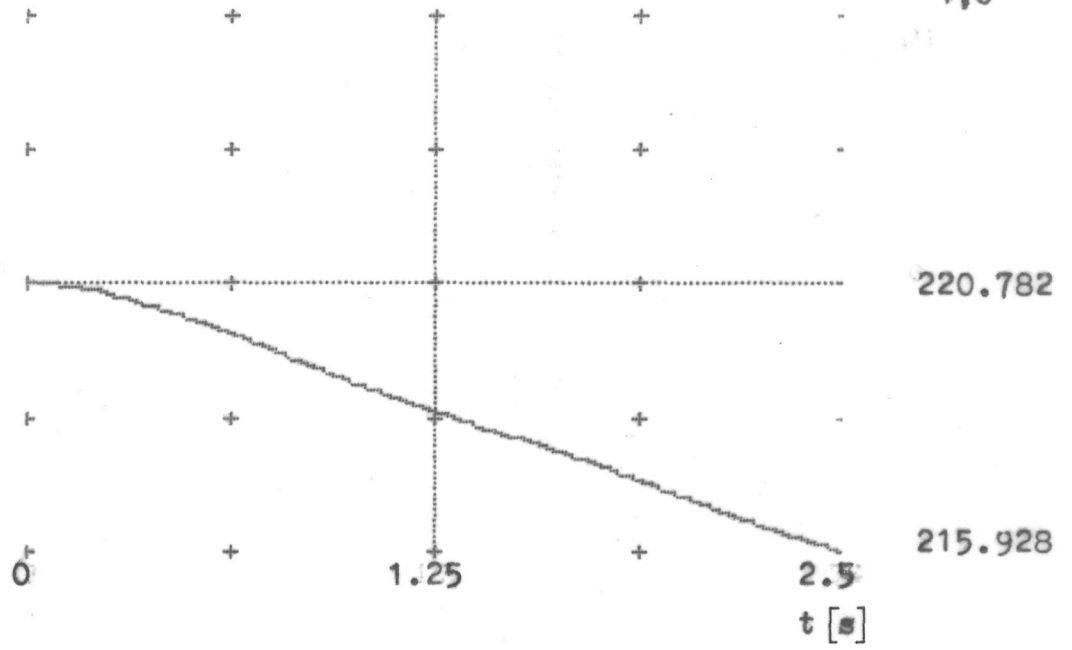
Anlage 3 - 3



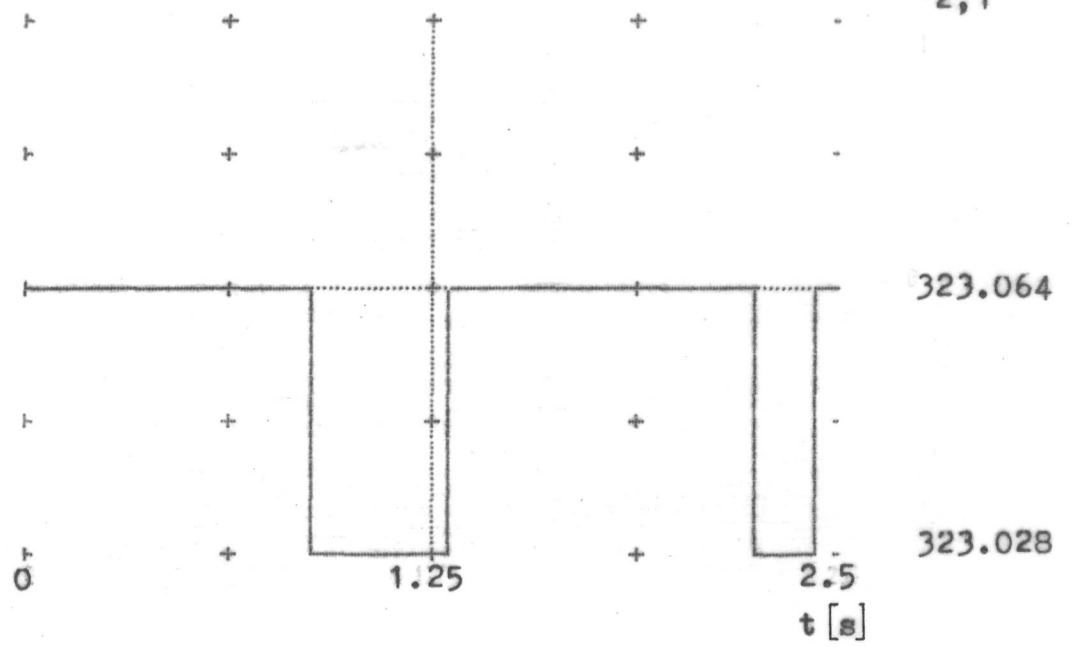


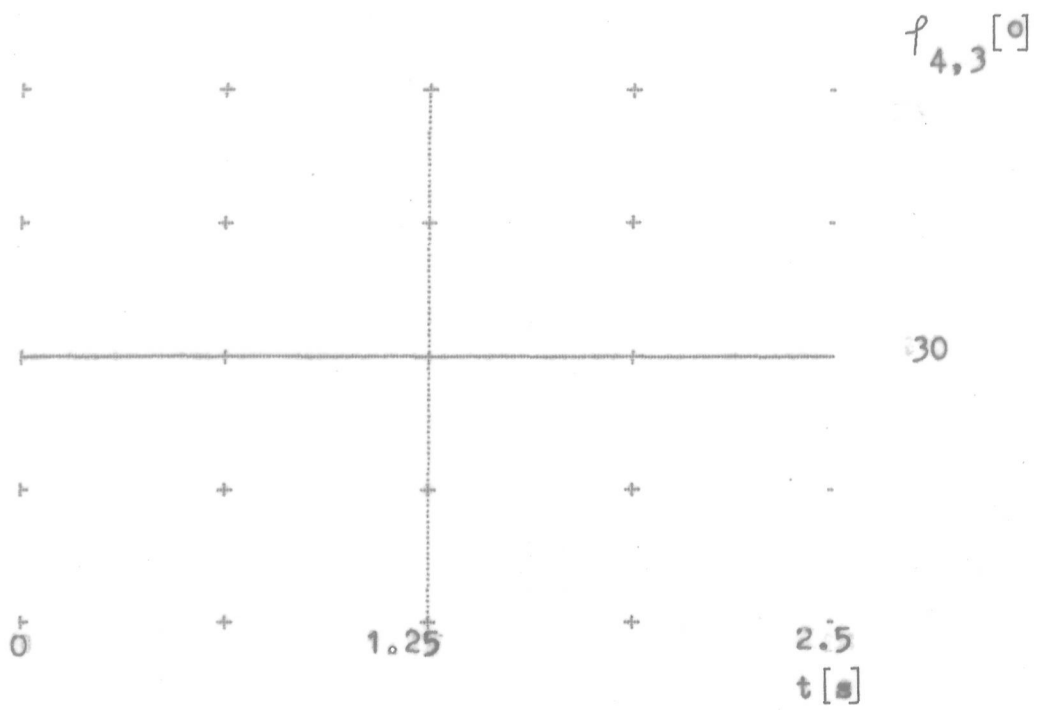
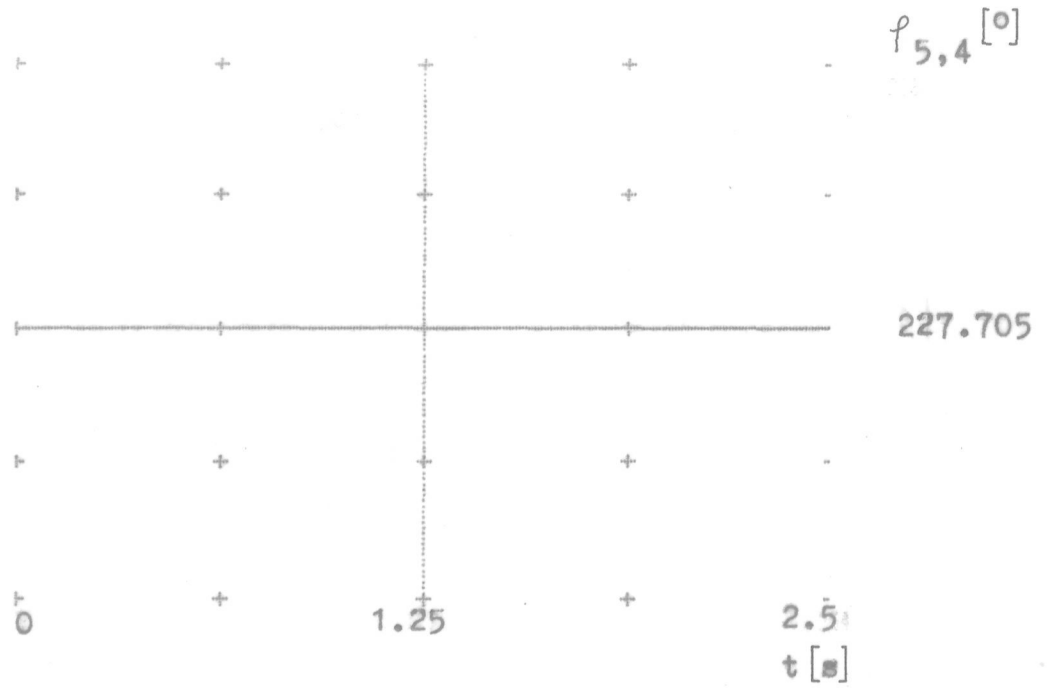


$\varphi_{1,0} [^\circ]$

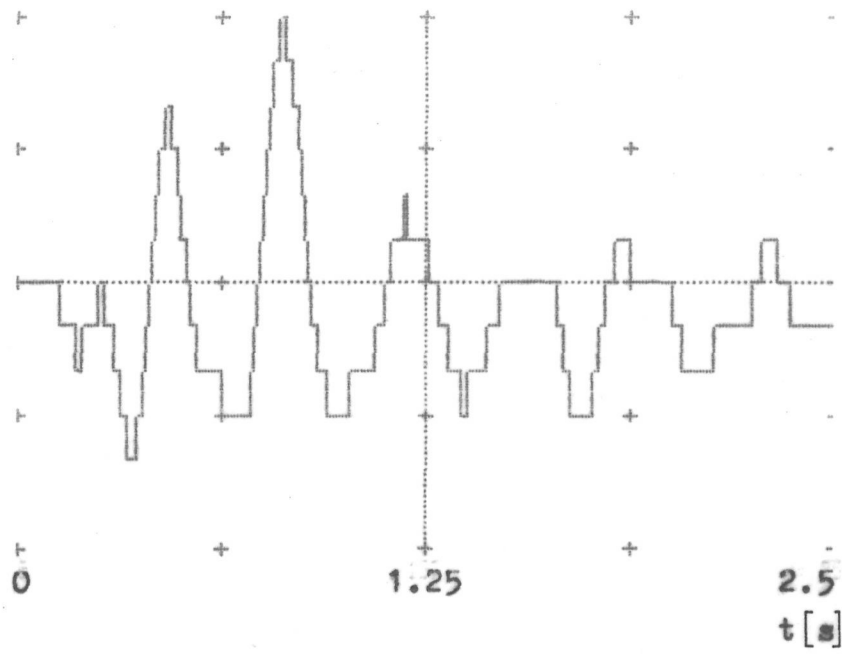


$\varphi_{2,1} [^\circ]$

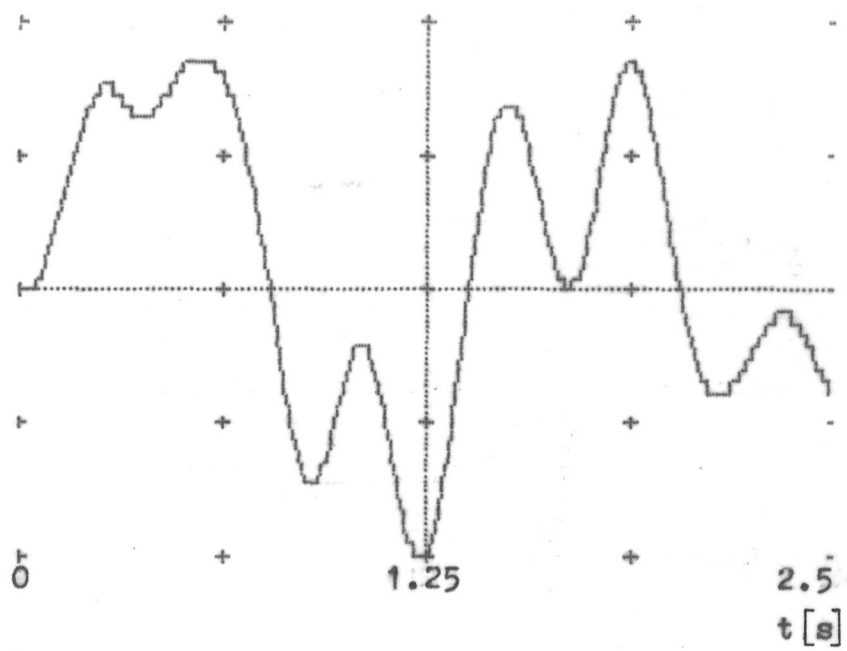


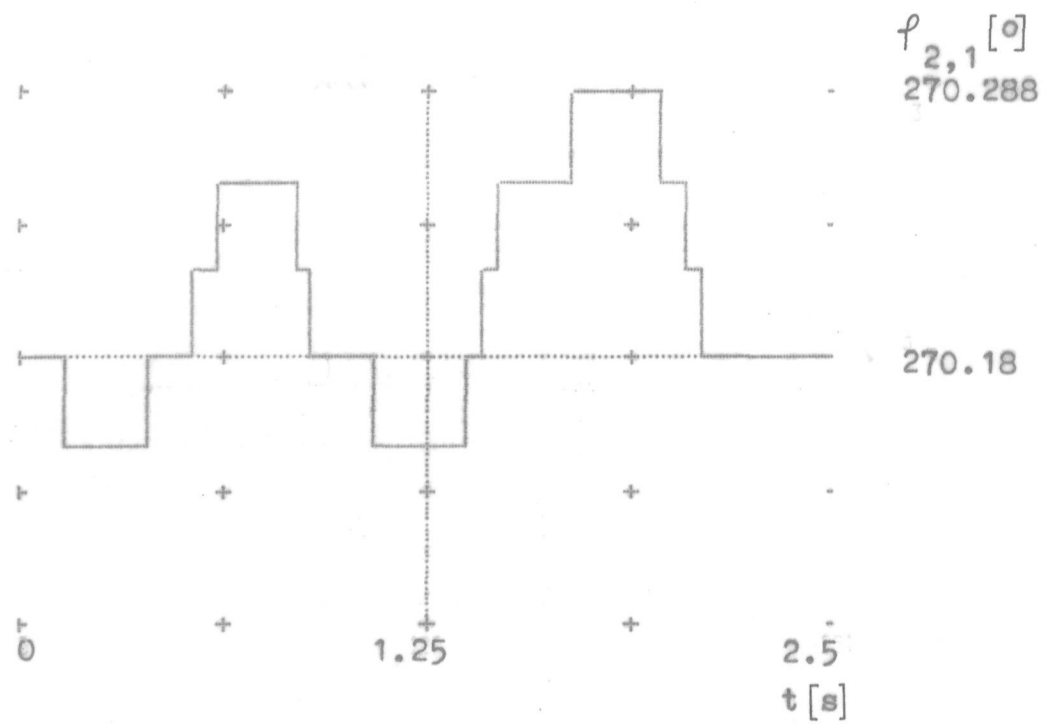
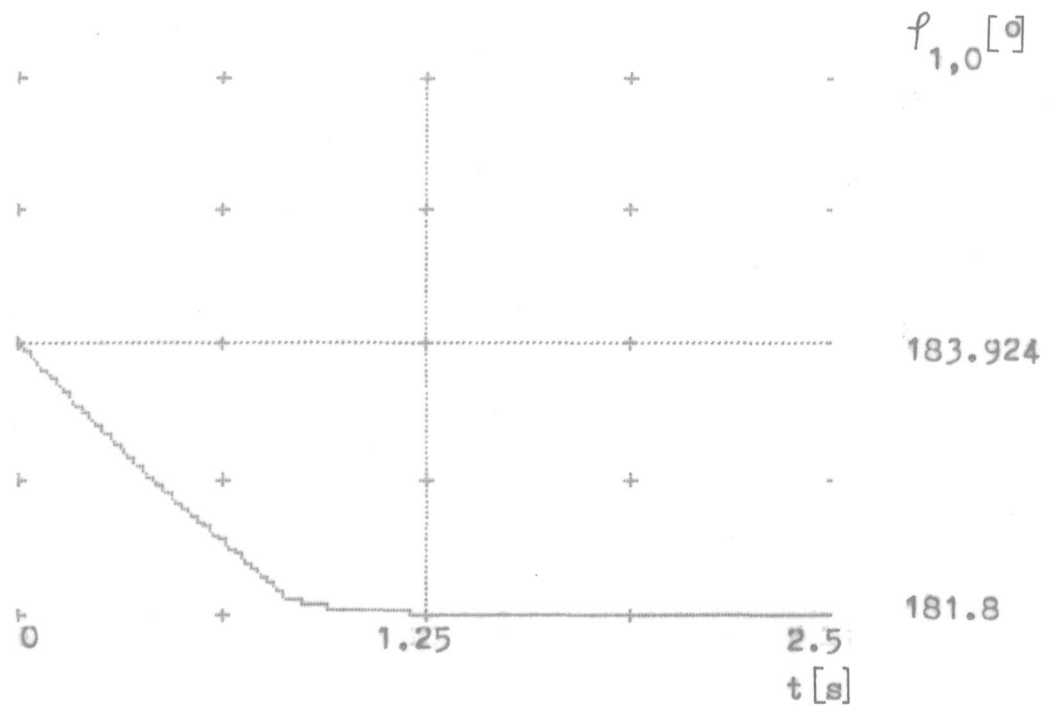


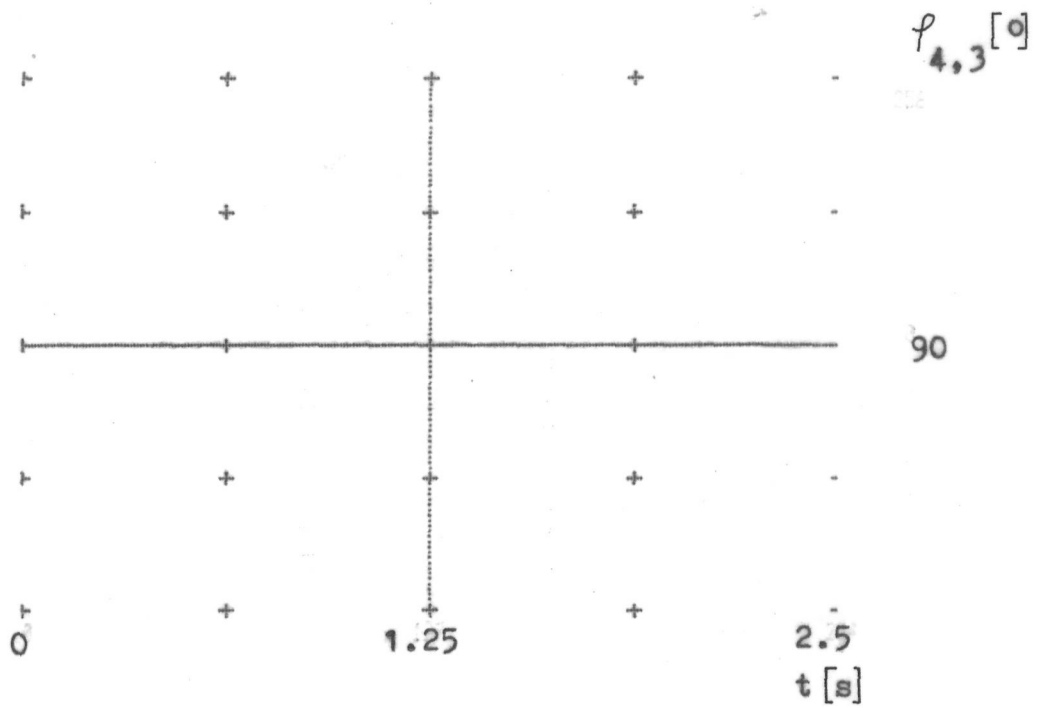
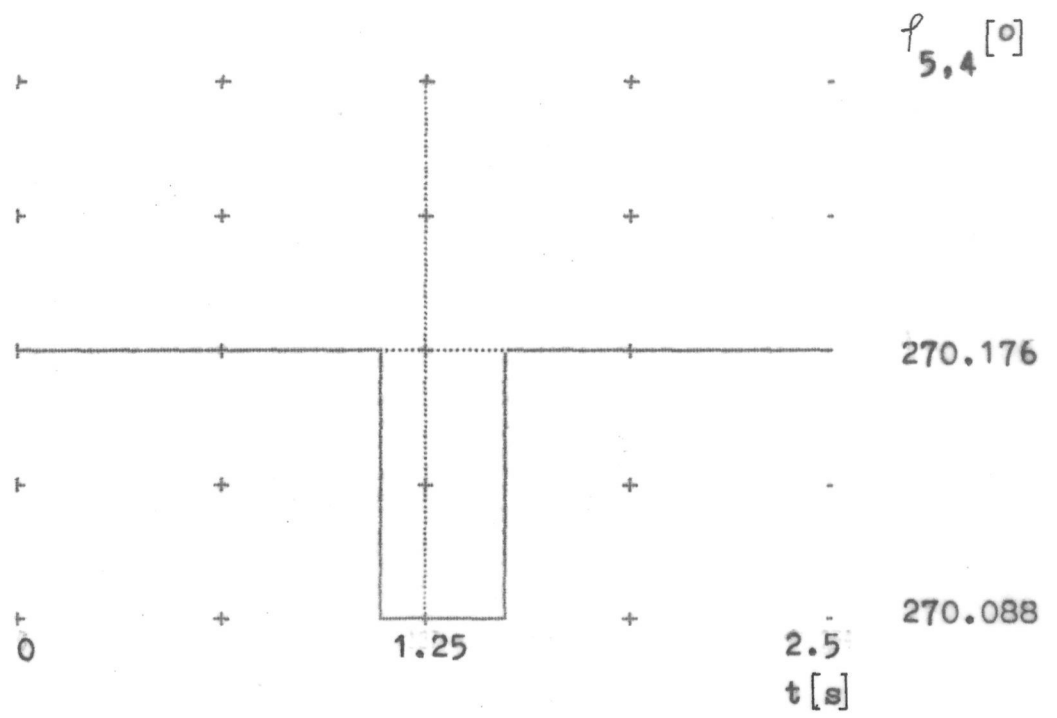
$\varphi_{S1} [^\circ]$
0.216

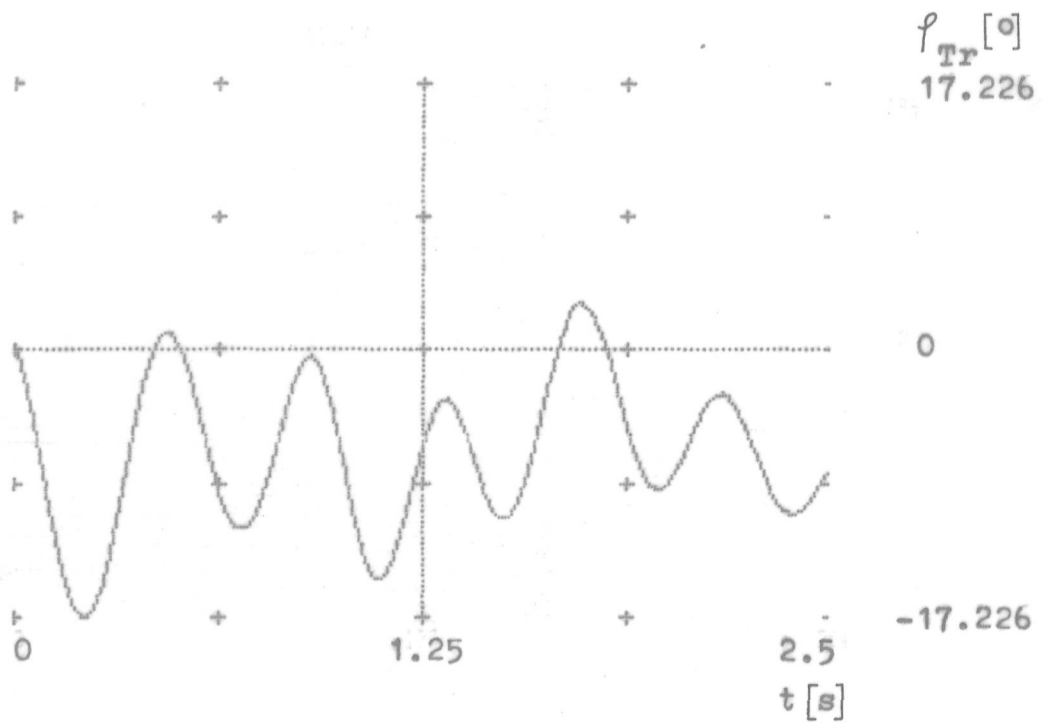
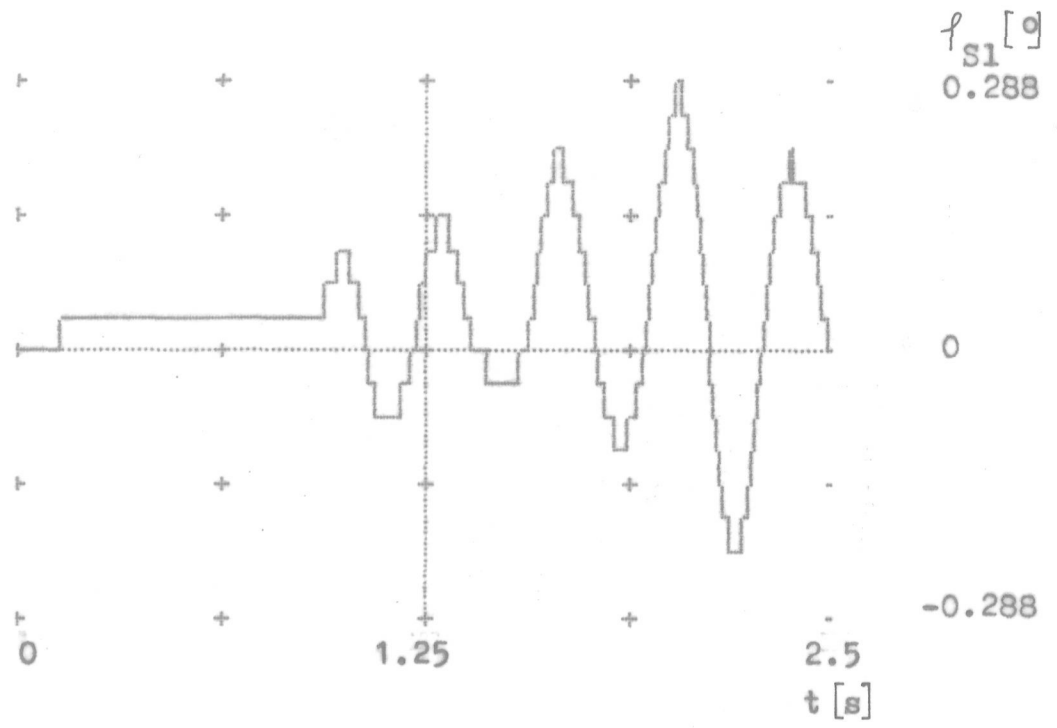


$\varphi_{Tr} [^\circ]$
2.02

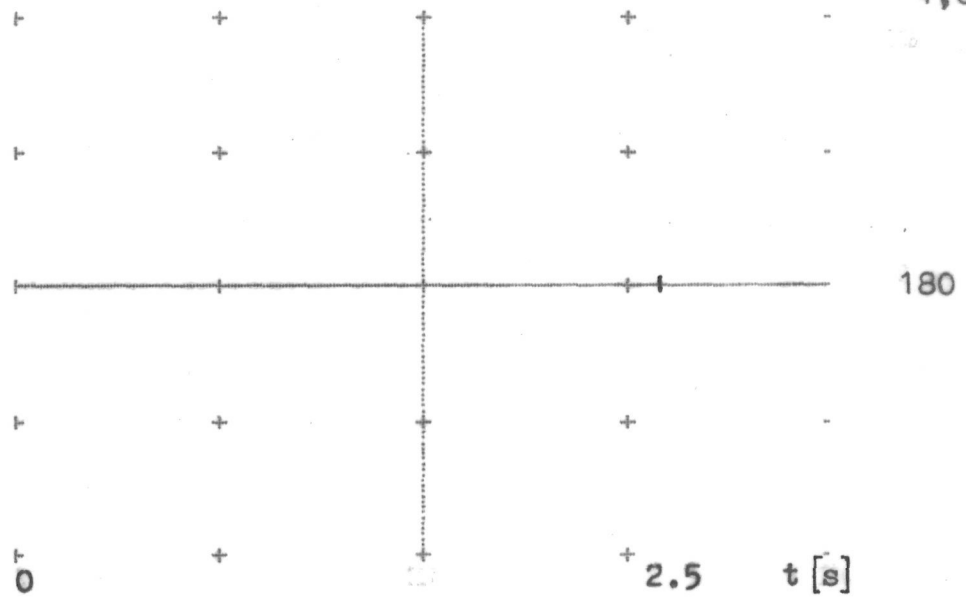




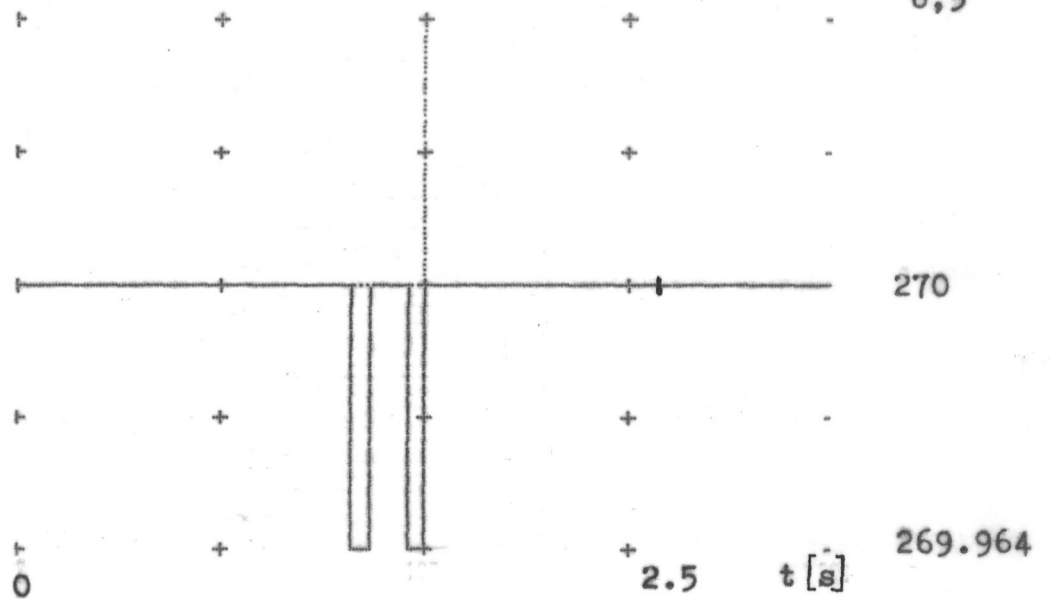


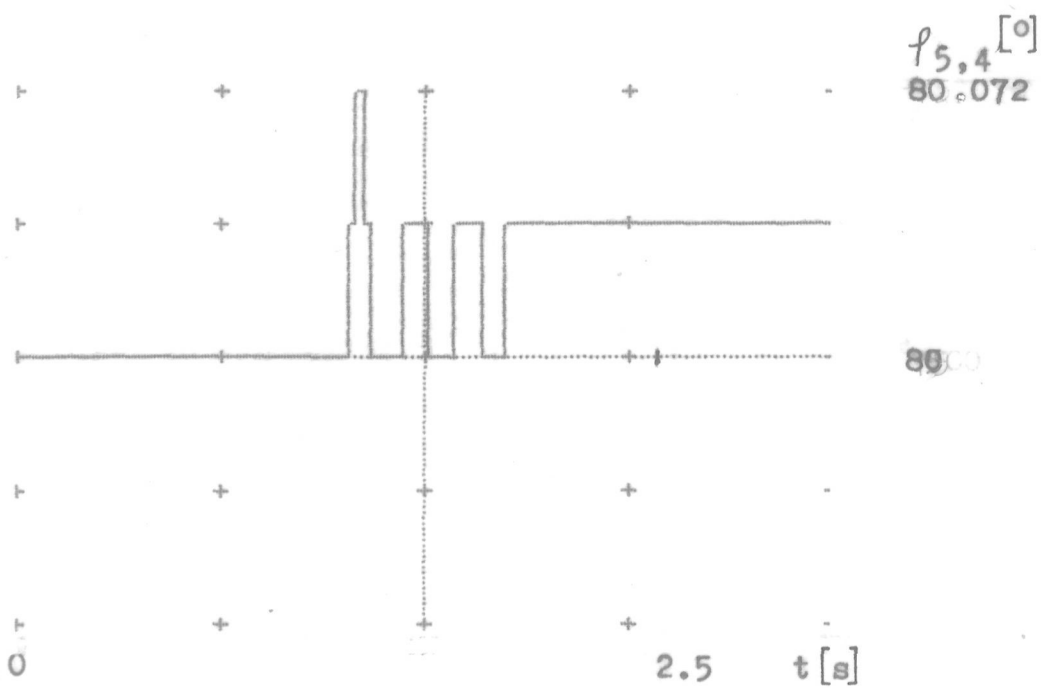
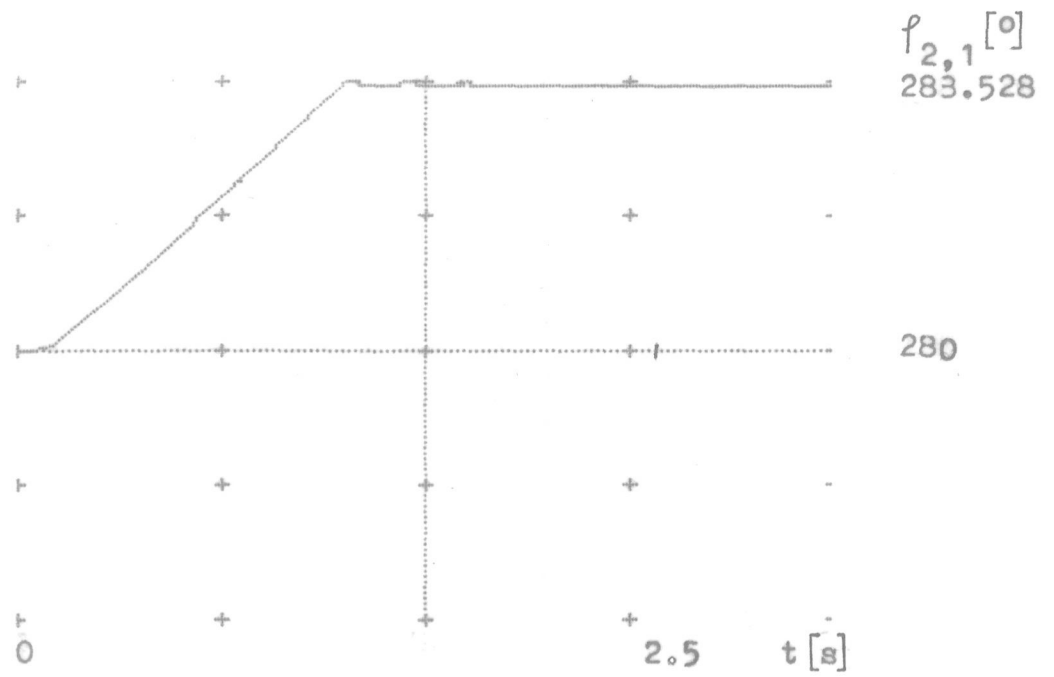


$\varphi_{1,0} [^\circ]$



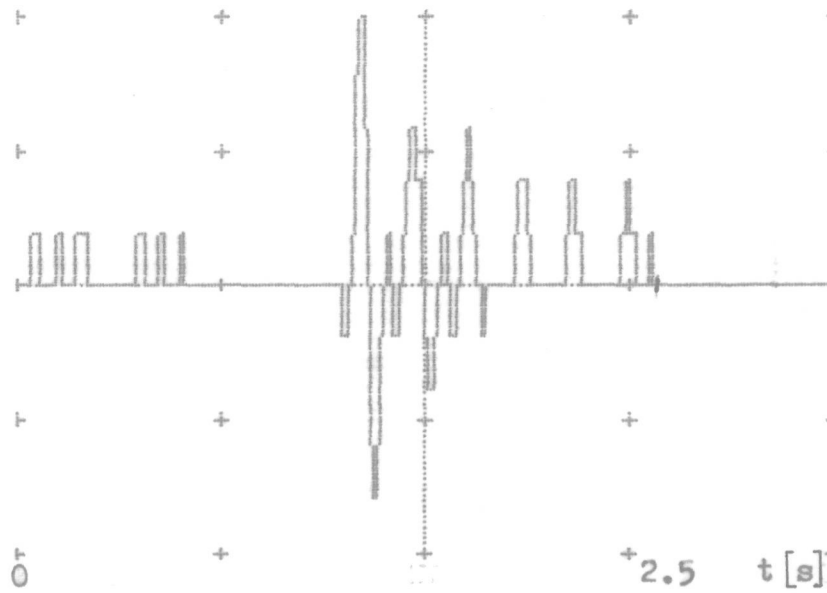
$\varphi_{6,5} [^\circ]$



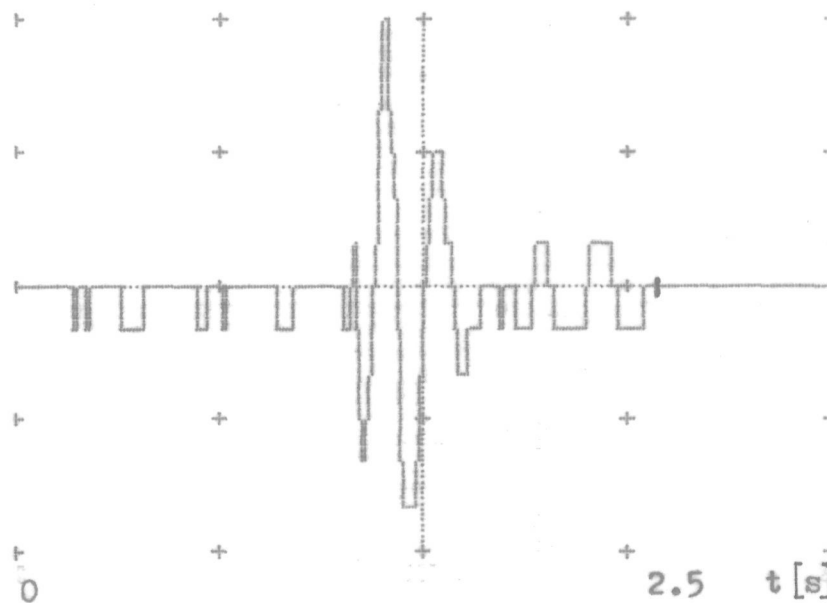


Anlage 3 - 6

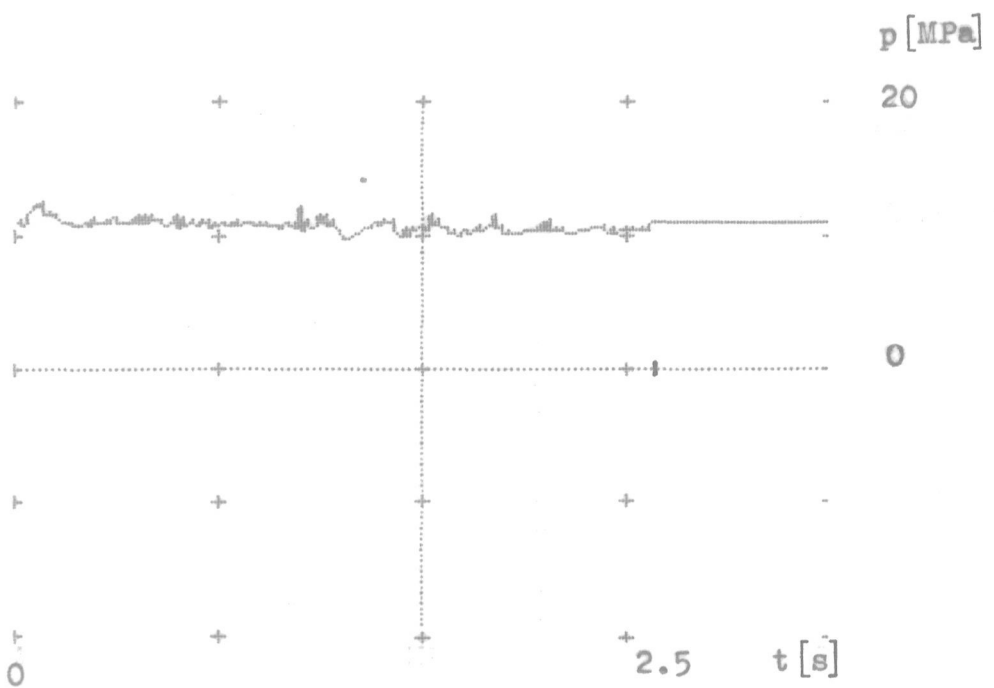
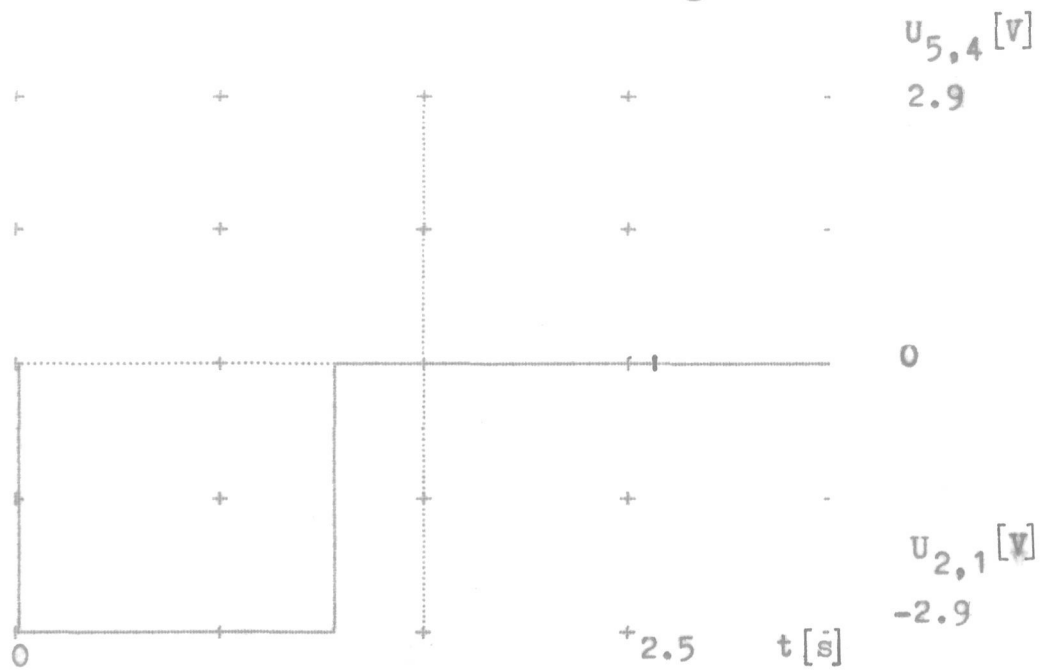
$\varphi_{S1} [^\circ]$
0.439



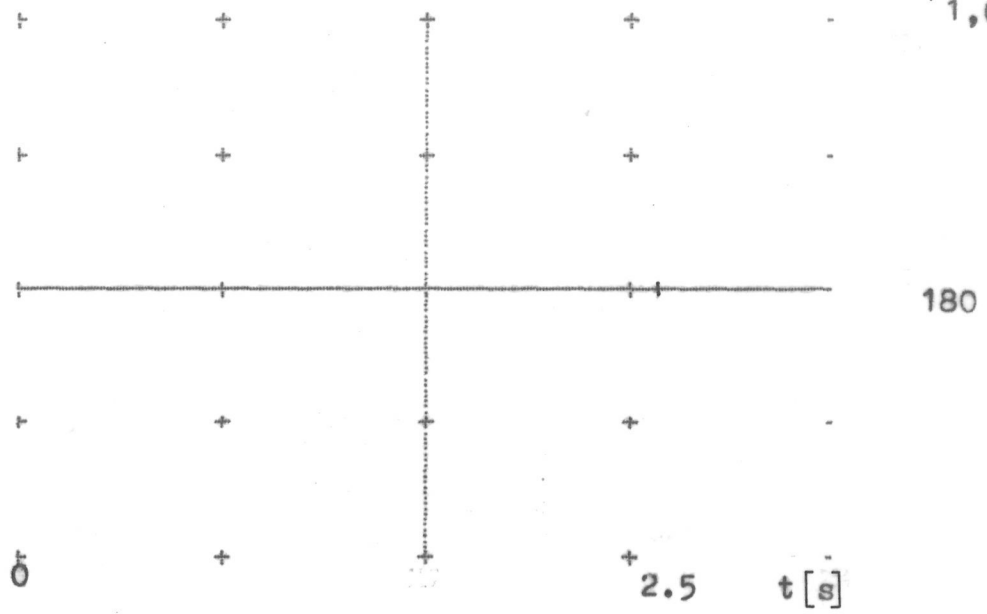
$\varphi_{Tr} [^\circ]$
0.527



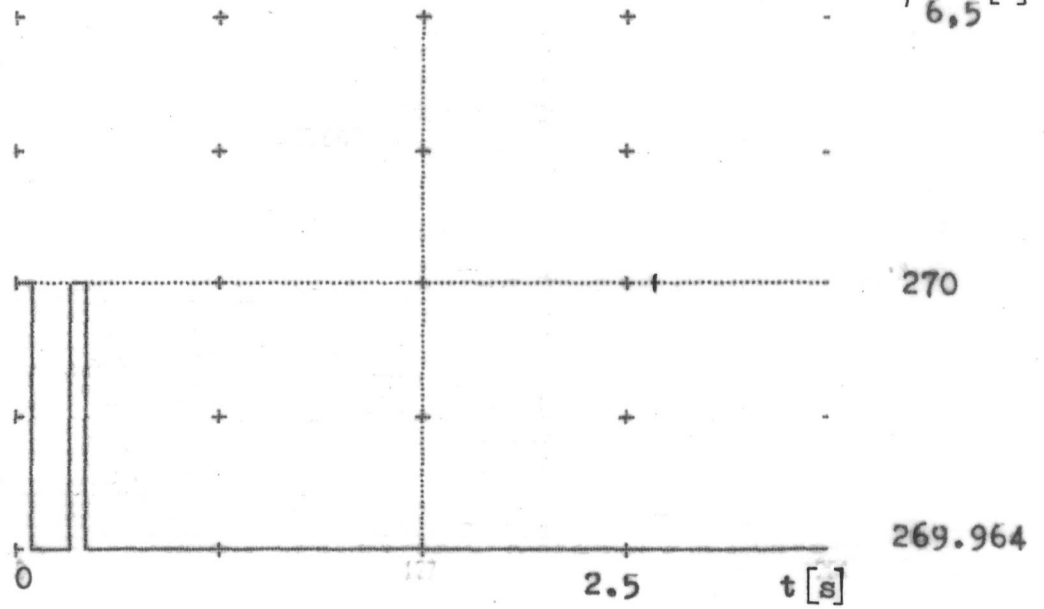
Anlage 3 - 6



$\varphi_{1,0} [^\circ]$

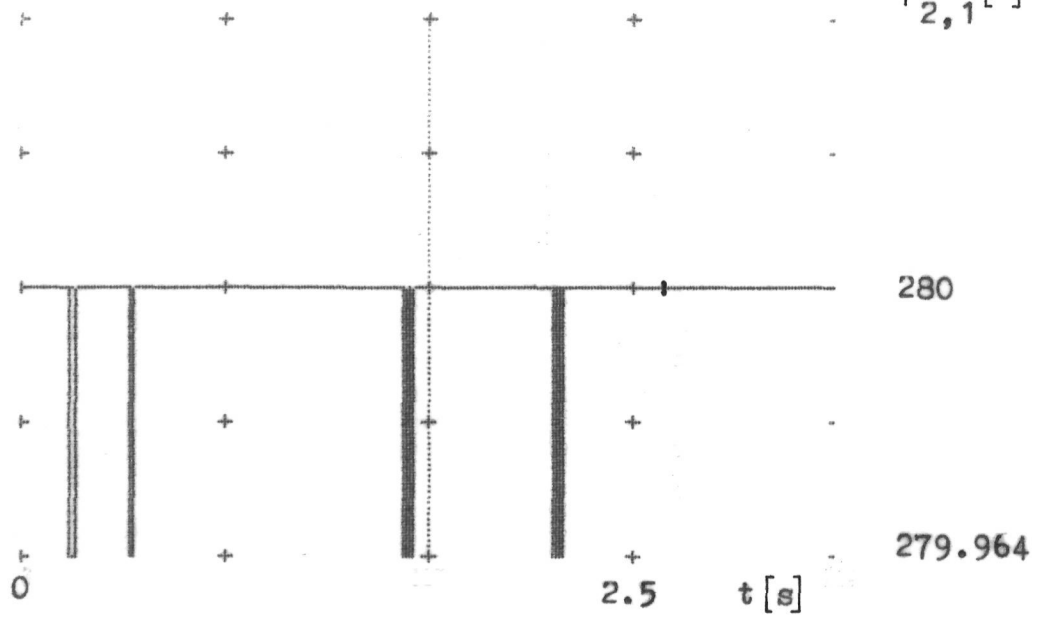


$\varphi_{6,5} [^\circ]$

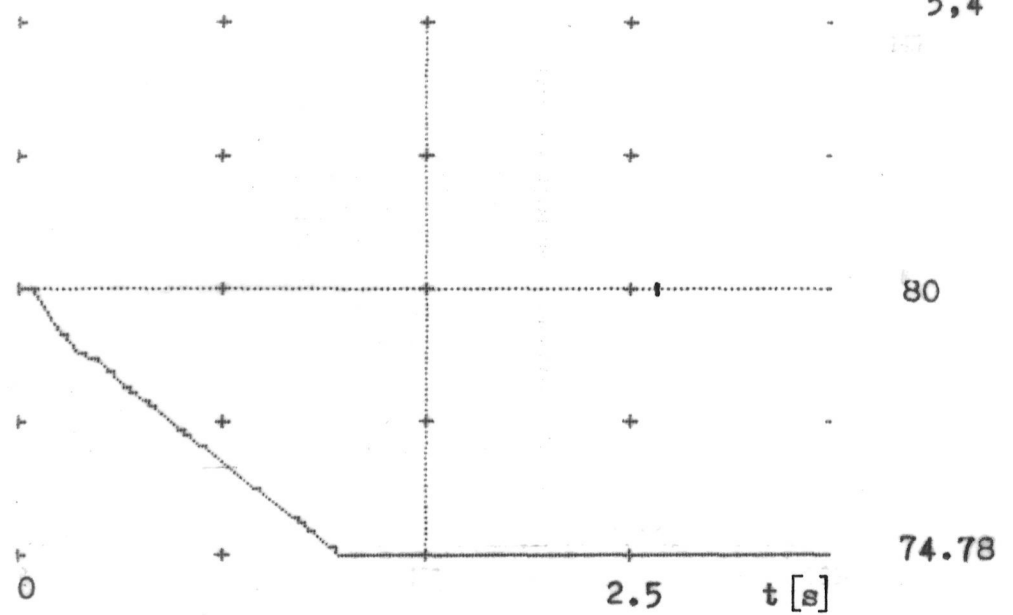


Anlage 3 - 7

$\varphi_{2,1} [^\circ]$

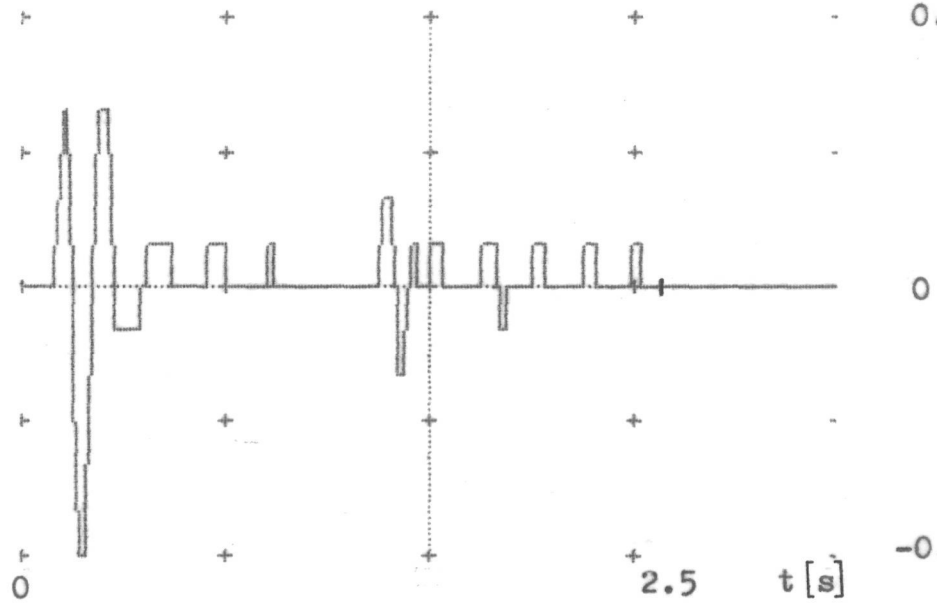


$\varphi_{5,4} [^\circ]$

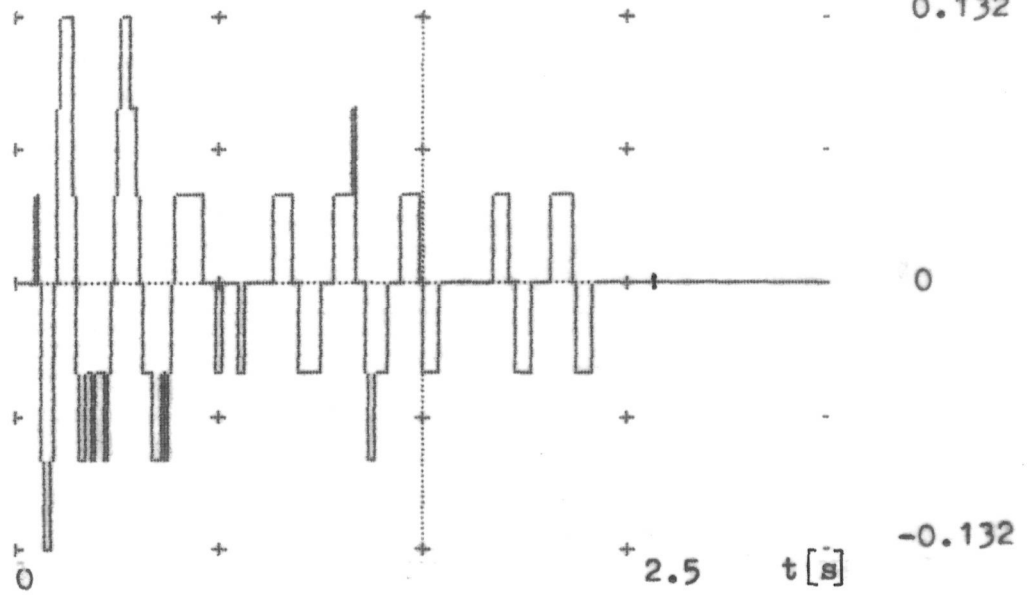


Anlage 3 - 7

$\rho_{S1} [^\circ]$
0.264

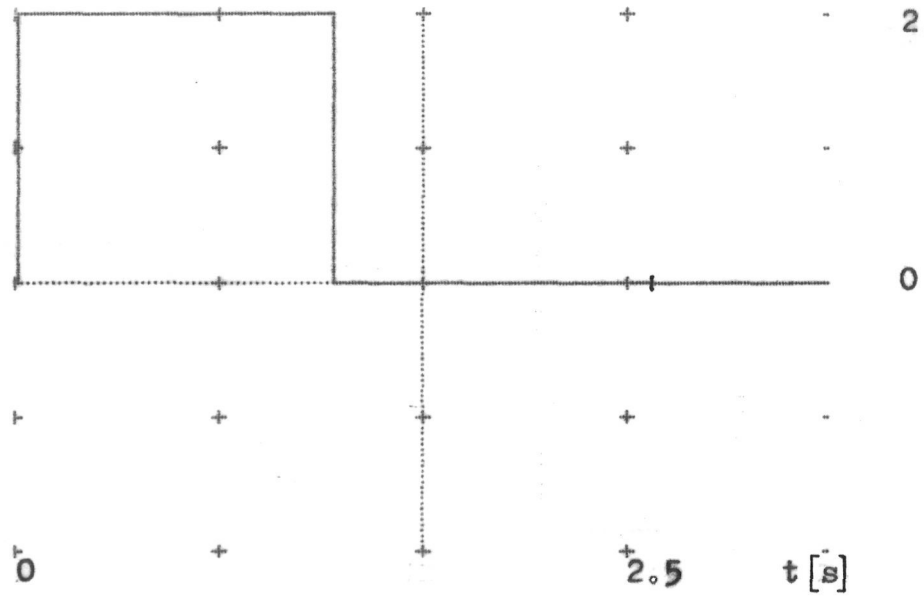


$\rho_{Tr} [^\circ]$
0.132

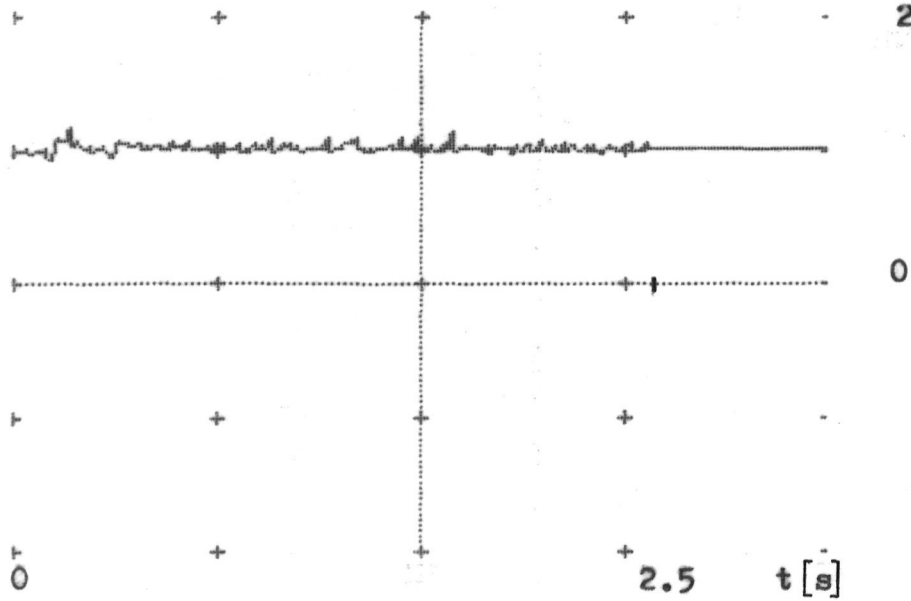


Anlage 3 - 7

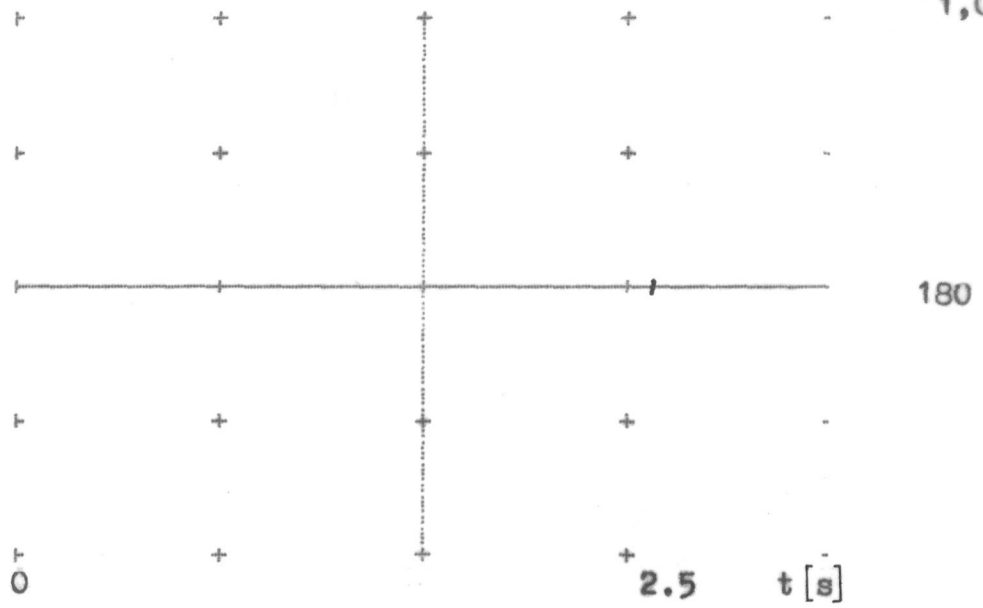
$U_{5,4} [V]$
2,9



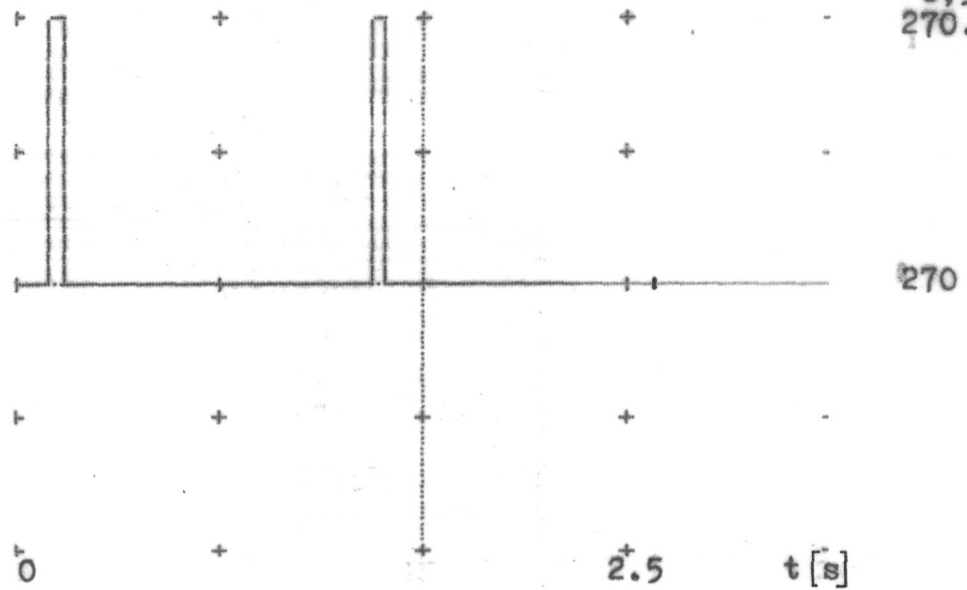
$p [MPa]$
20



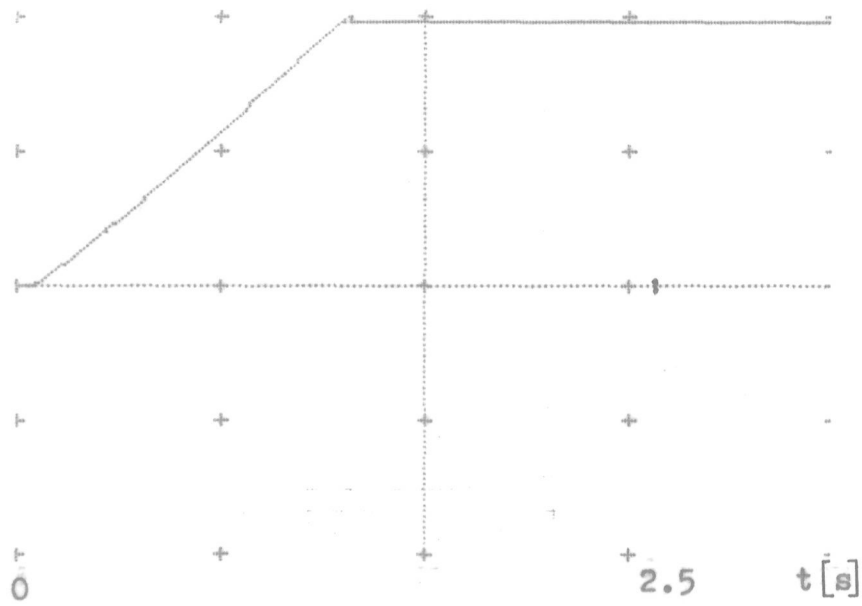
$\rho_{1,0} [^\circ]$



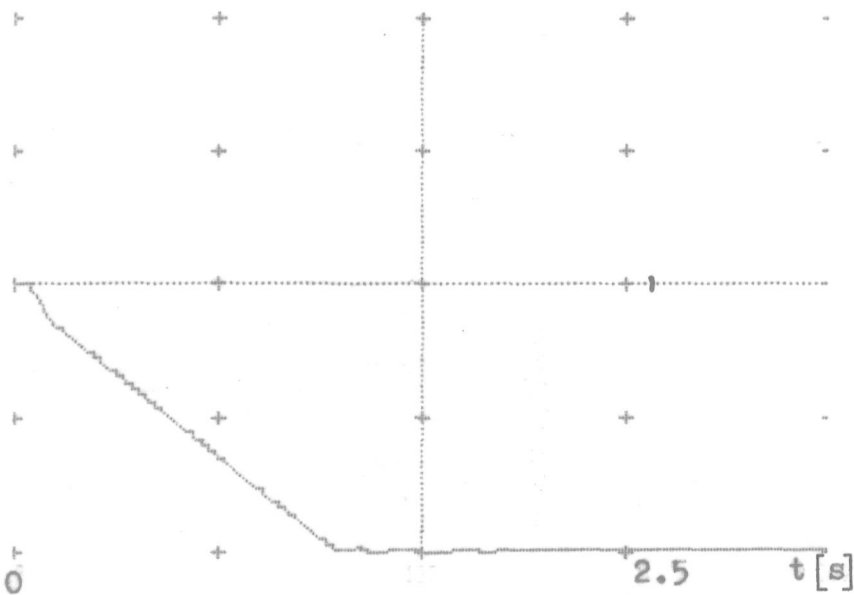
$\rho_{6,5} [^\circ]$
270.036



$\varphi_{2,1} [^\circ]$
283.492

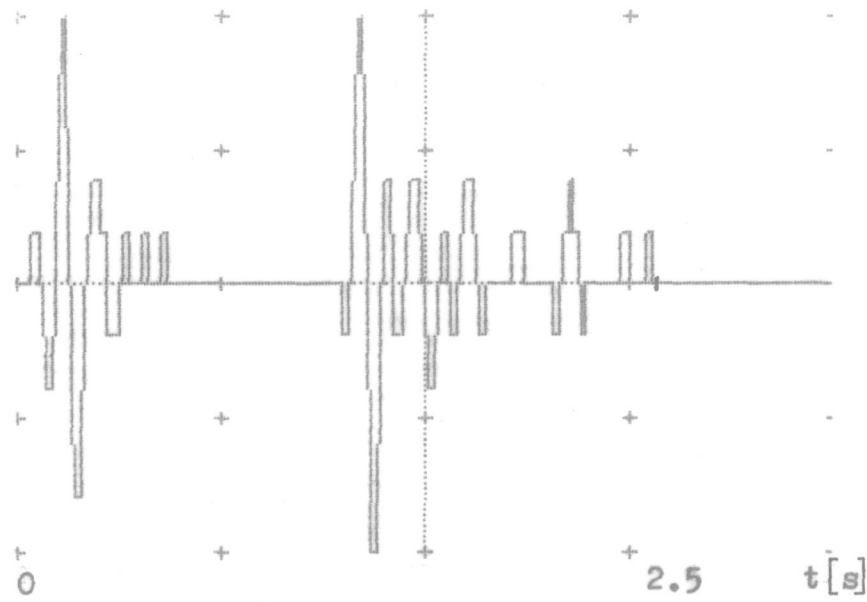


$\varphi_{5,4} [^\circ]$

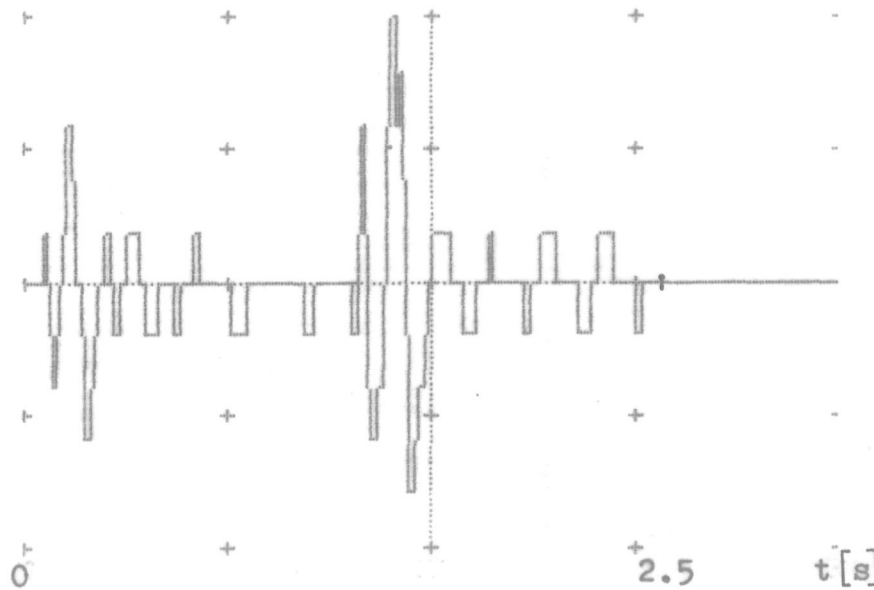


74.852

$f_{Sl} [^\circ]$
0.439

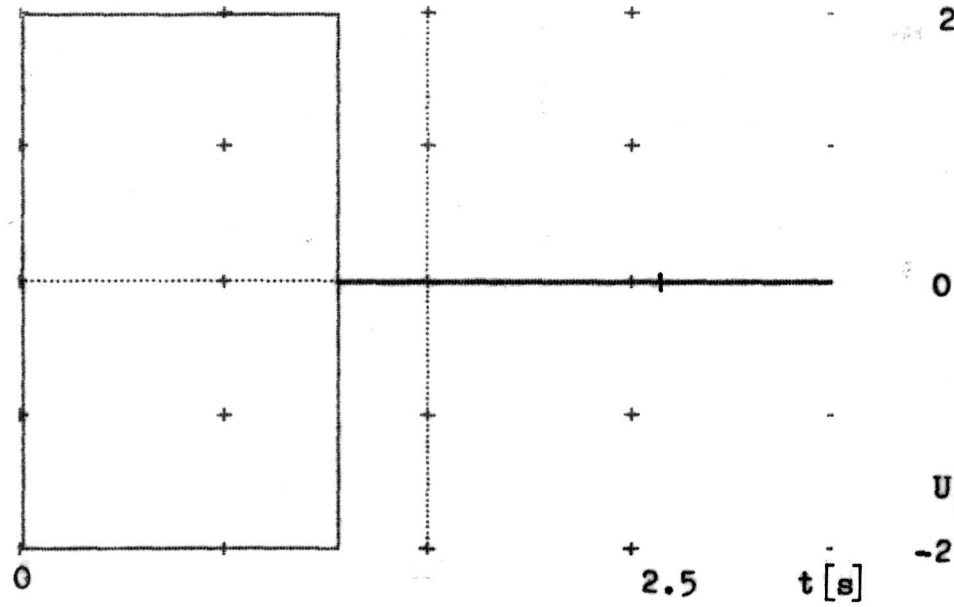


$f_{Tr} [^\circ]$
0.439



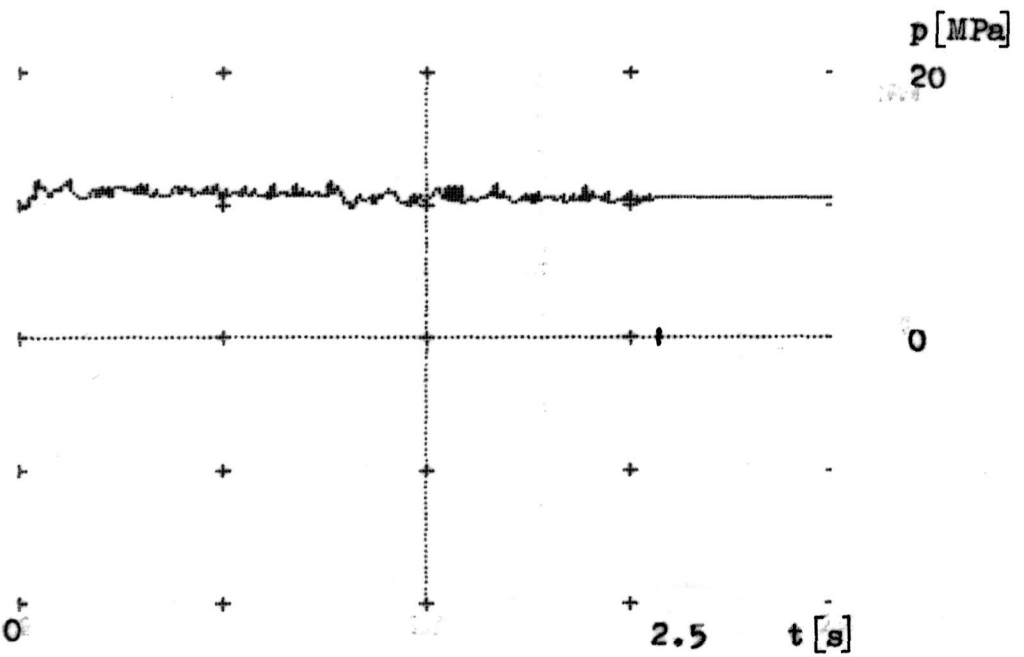
$U_{5,4}$ [V]

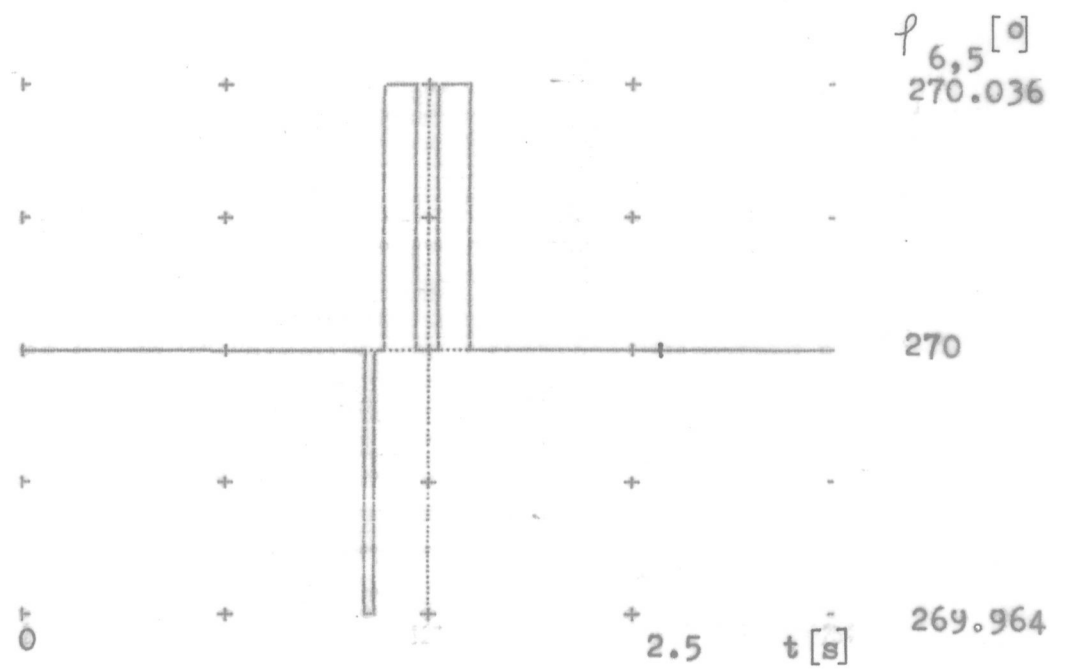
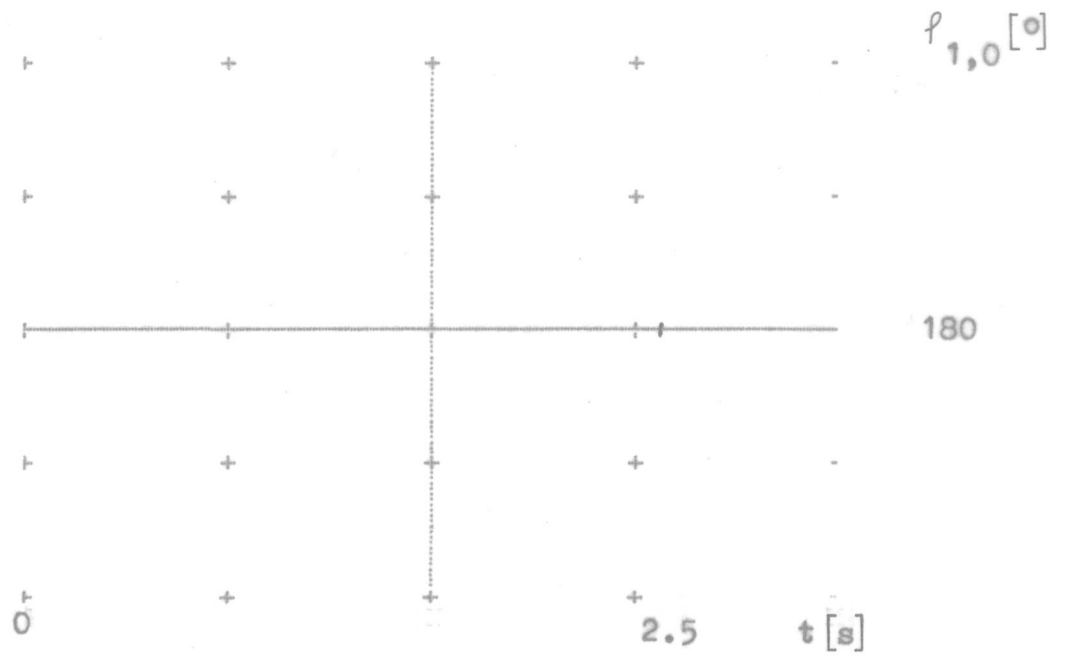
2.9



$U_{2,1}$ [V]

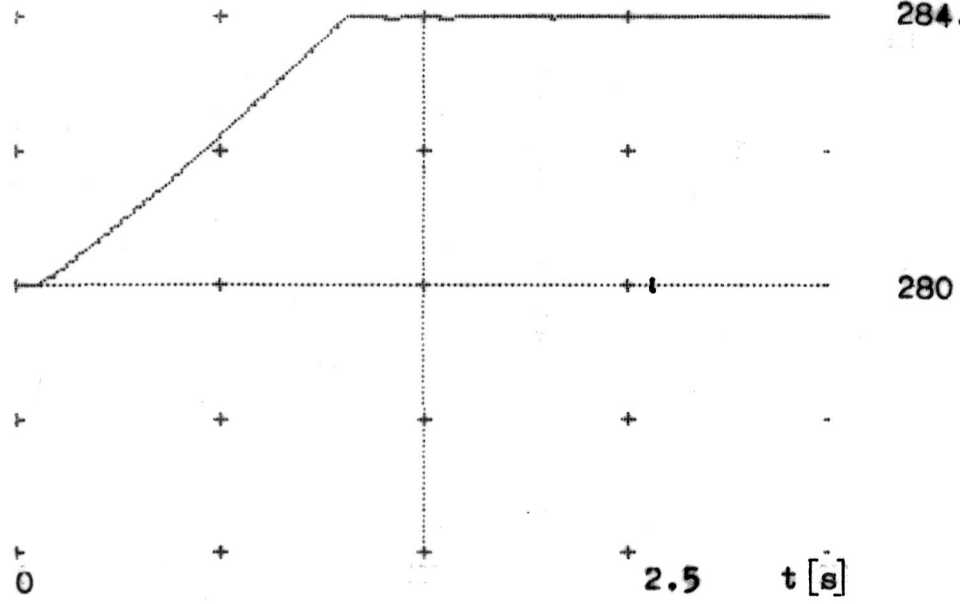
-2.9



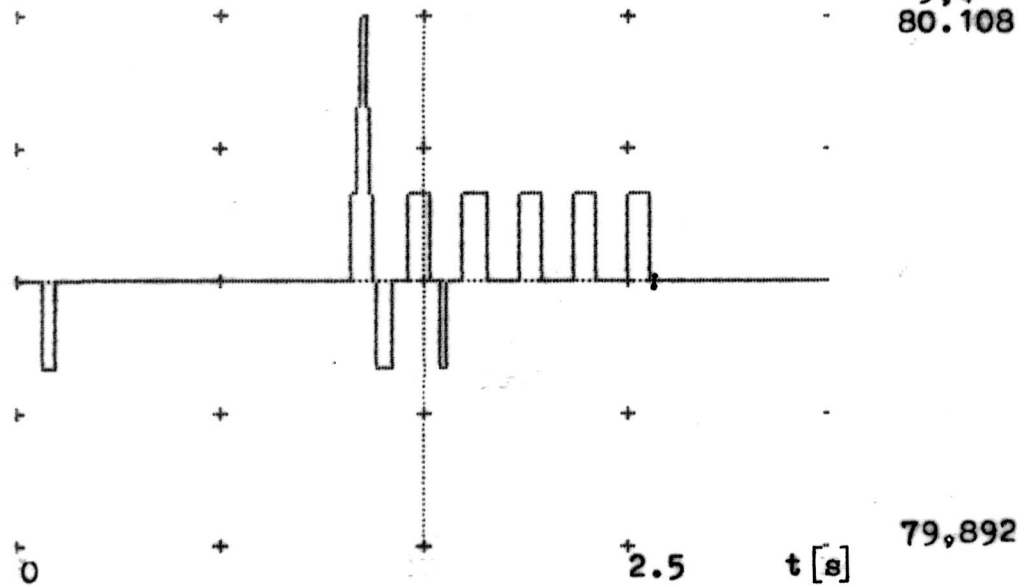


Anlage 3 - 9

$p_{2,1} [^\circ]$
284.716



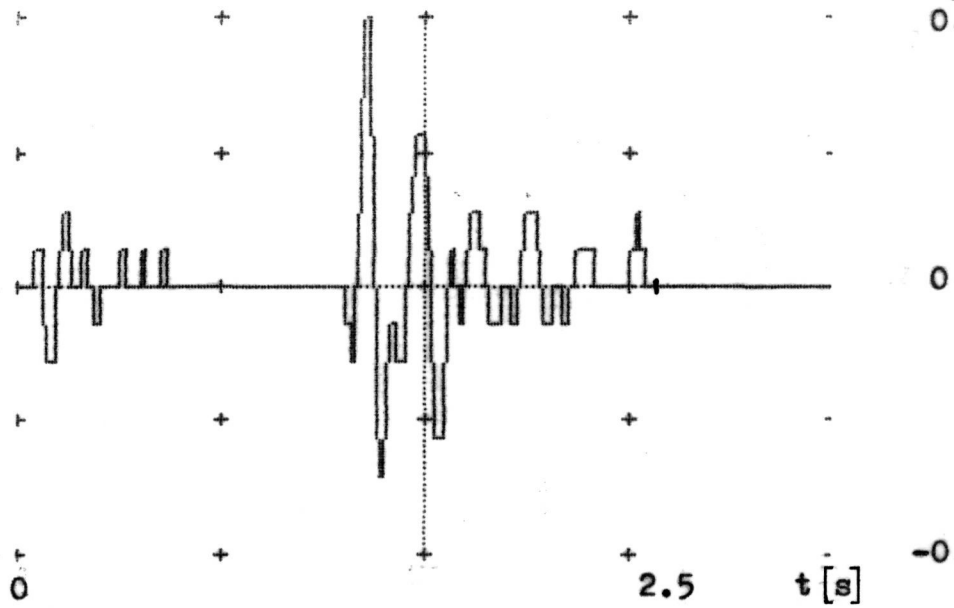
$p_{5,4} [^\circ]$
80.108



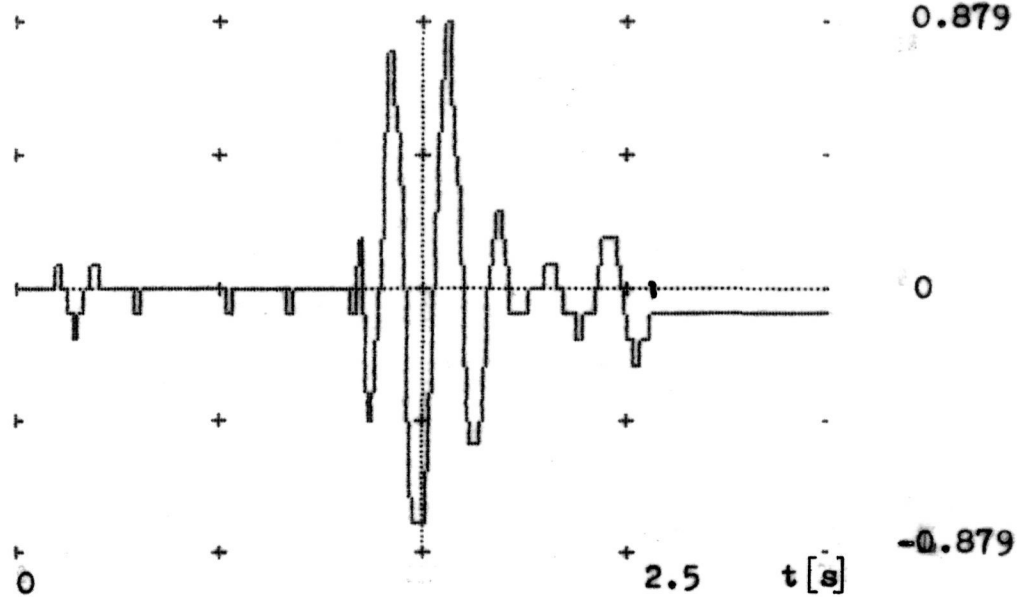
79.892

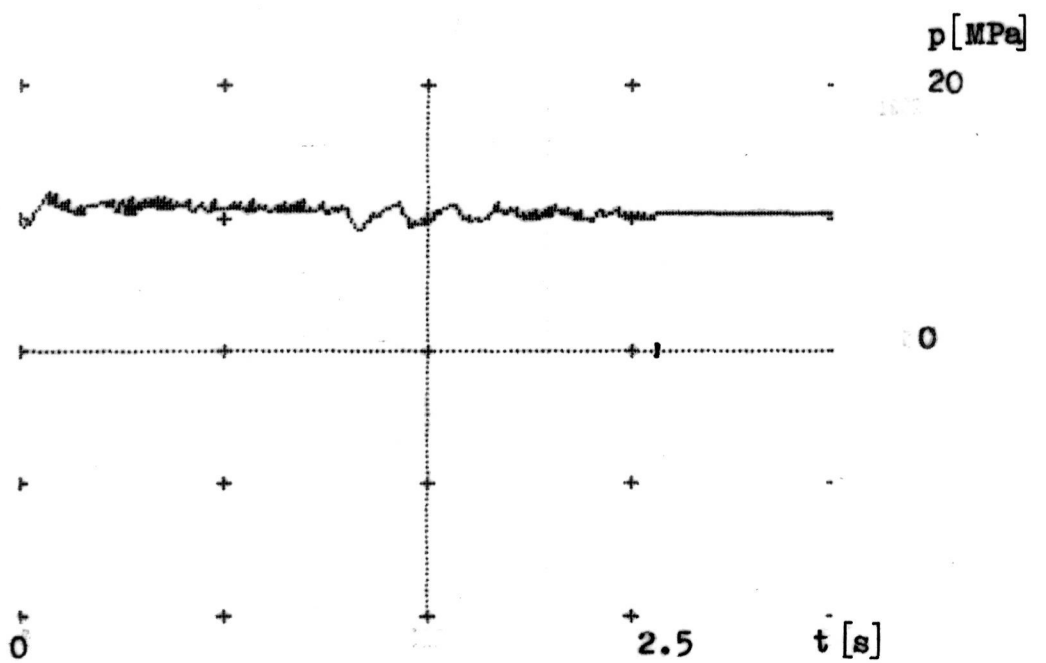
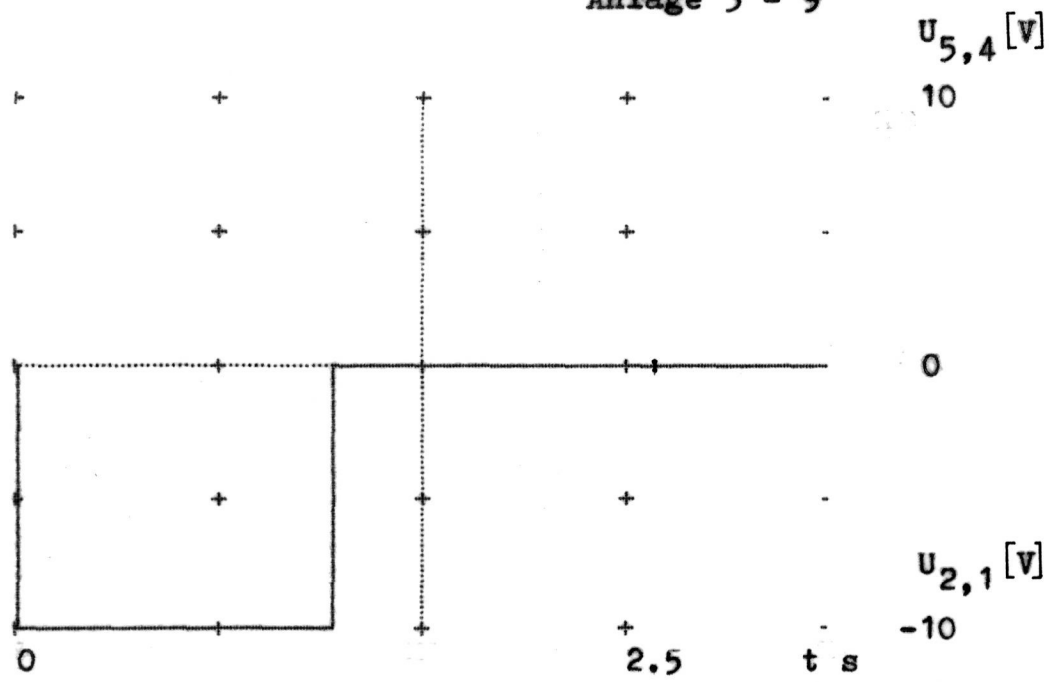
Anlage 3 - 9

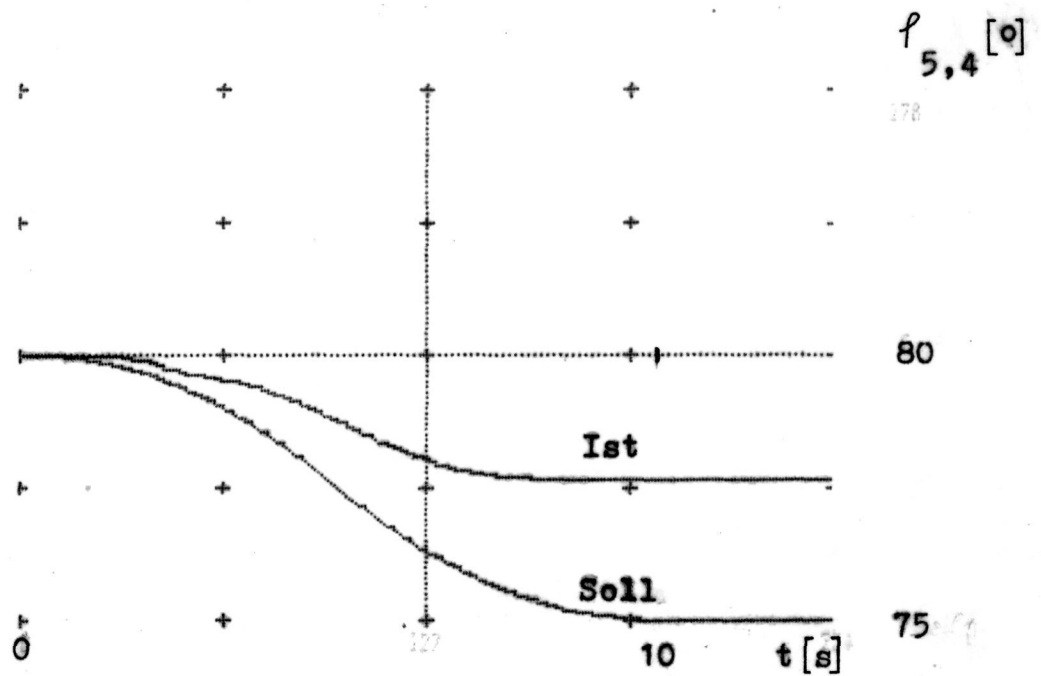
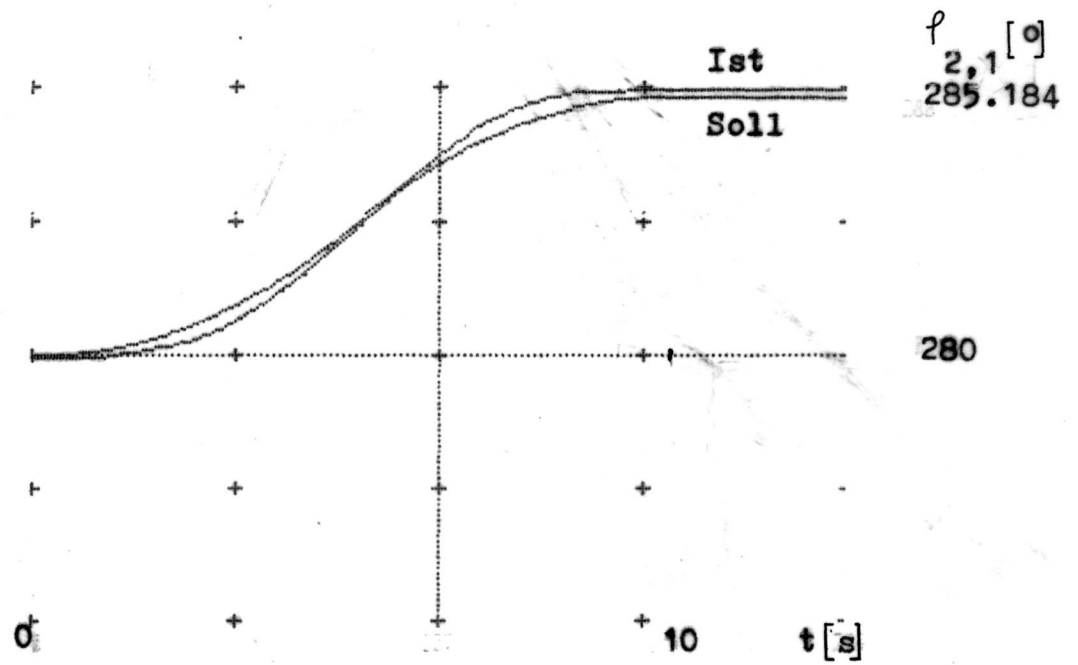
$\varphi_{Sl} [^\circ]$
0.615



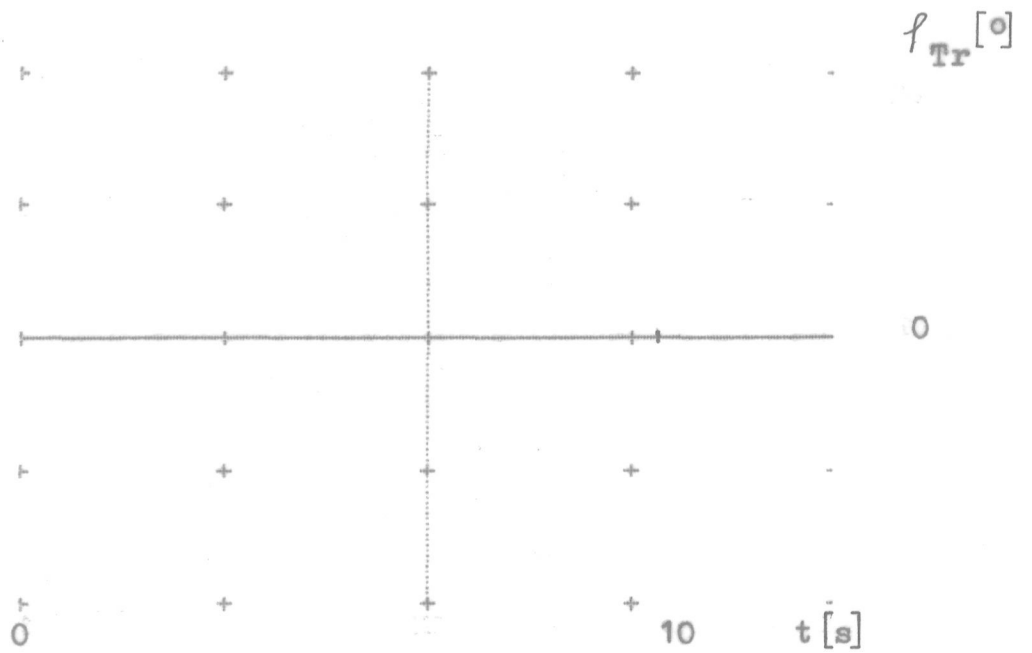
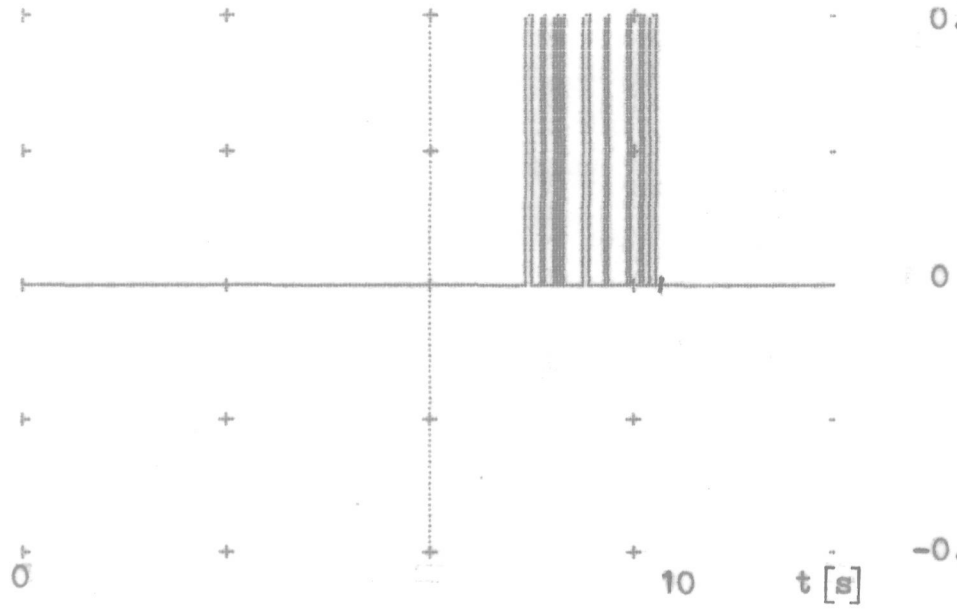
$\varphi_{Tr} [^\circ]$
0.879

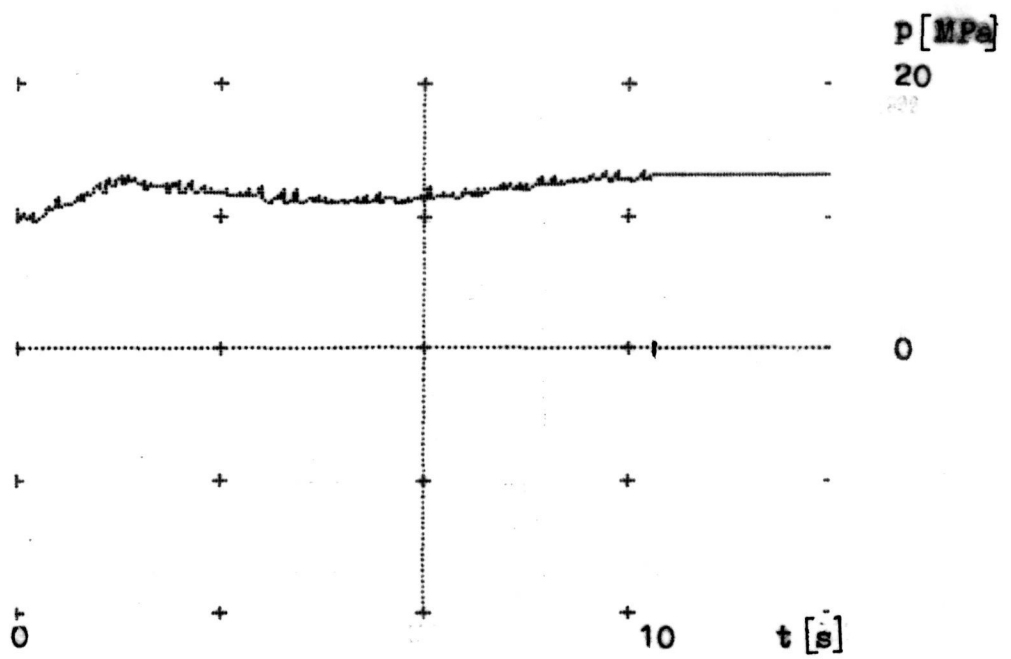
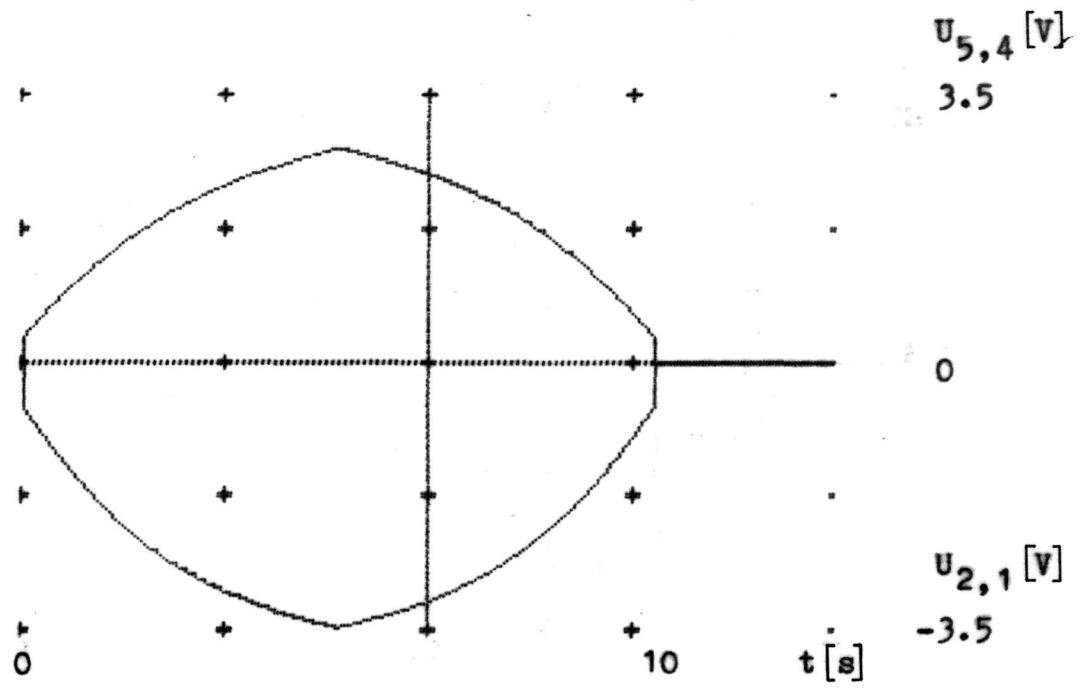


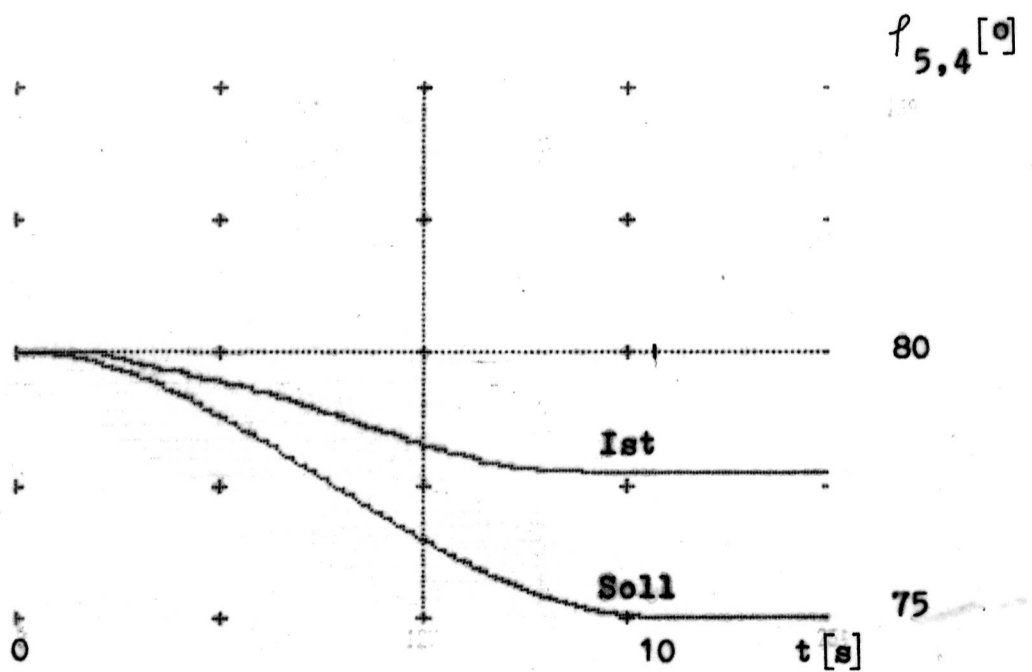
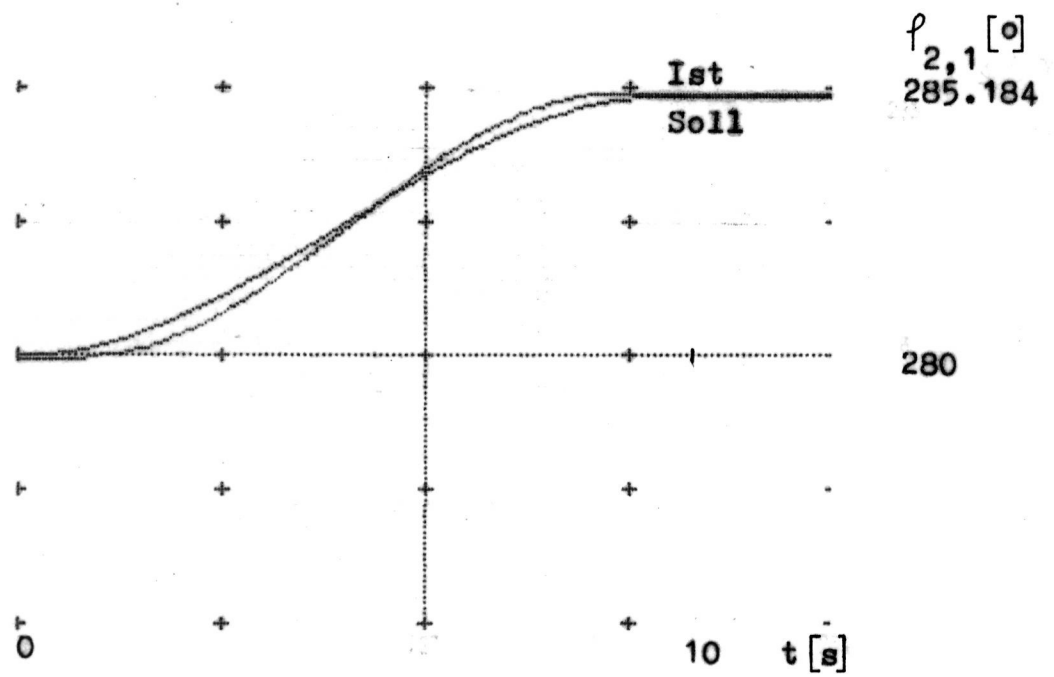




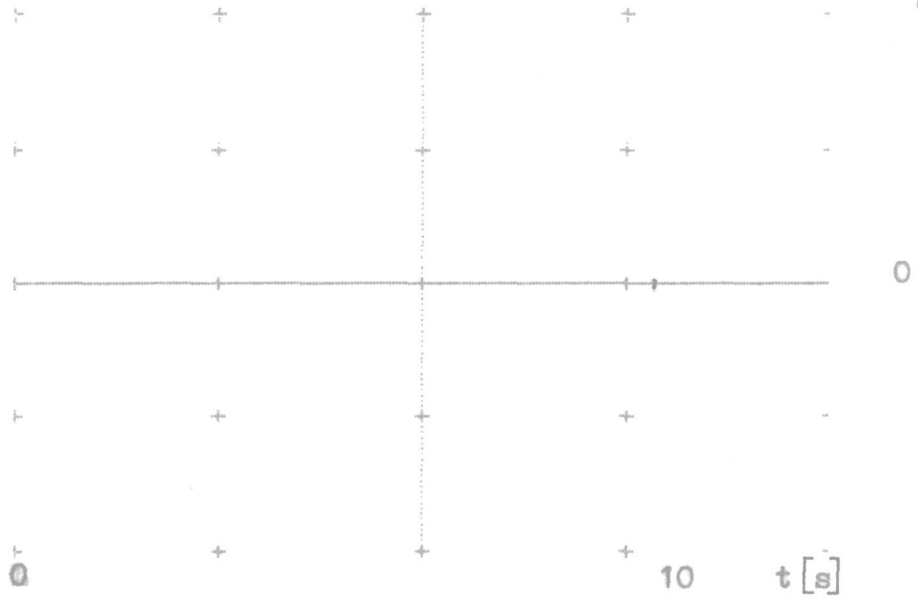
Anlage 4 - 1
 $\varphi_{S1} [^\circ]$
 0.088



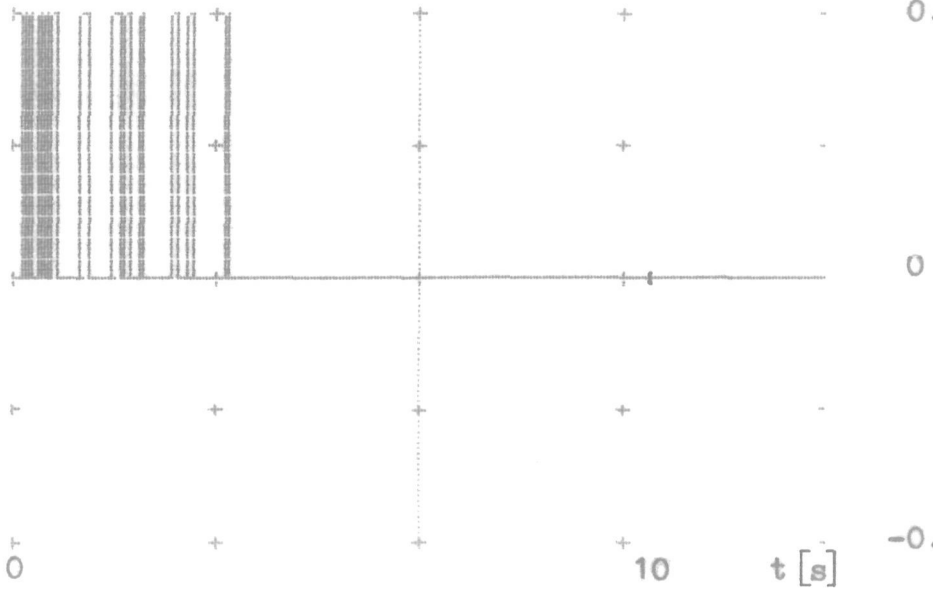




$\varphi_{S1} [^\circ]$



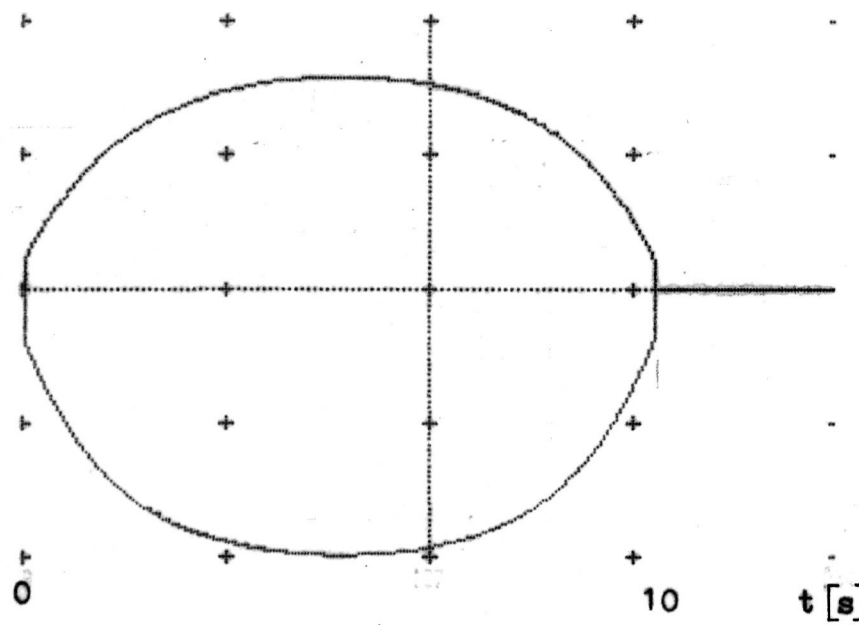
$\varphi_{Tr} [^\circ]$
0.088



-0.088

$U_{5,4} [V]$

3.26

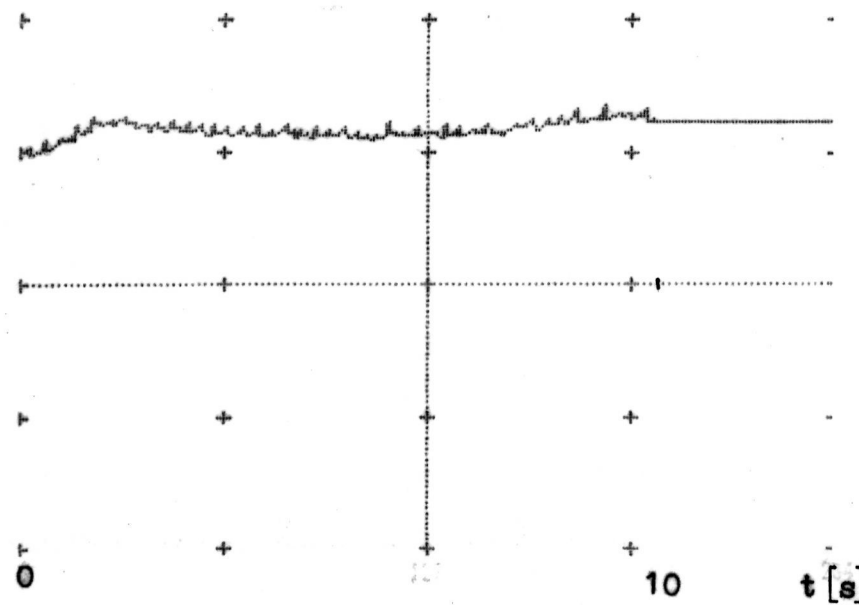


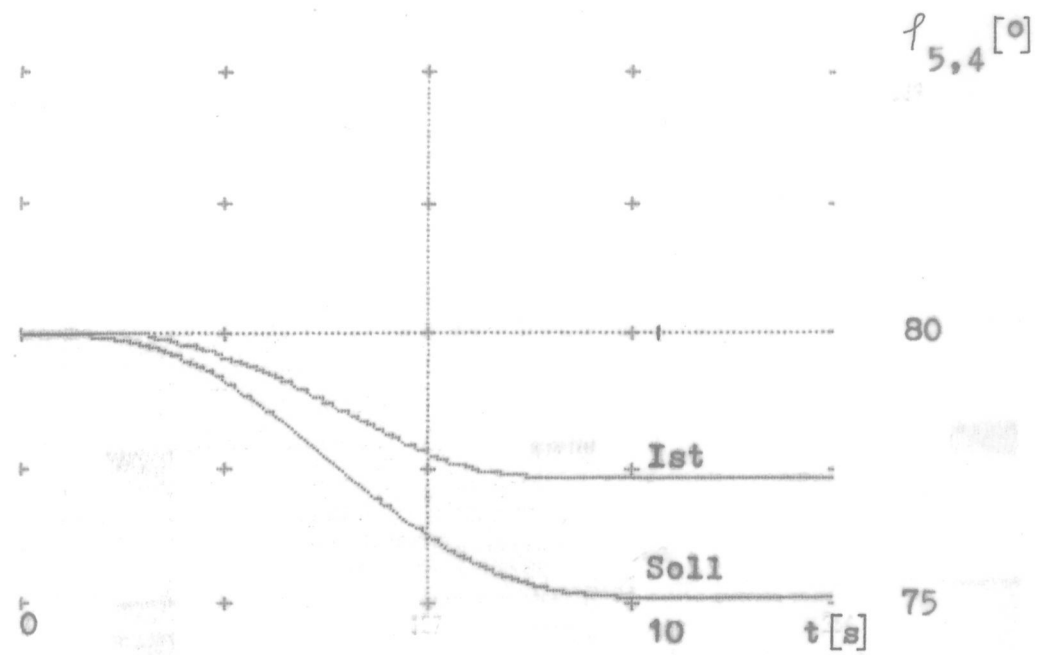
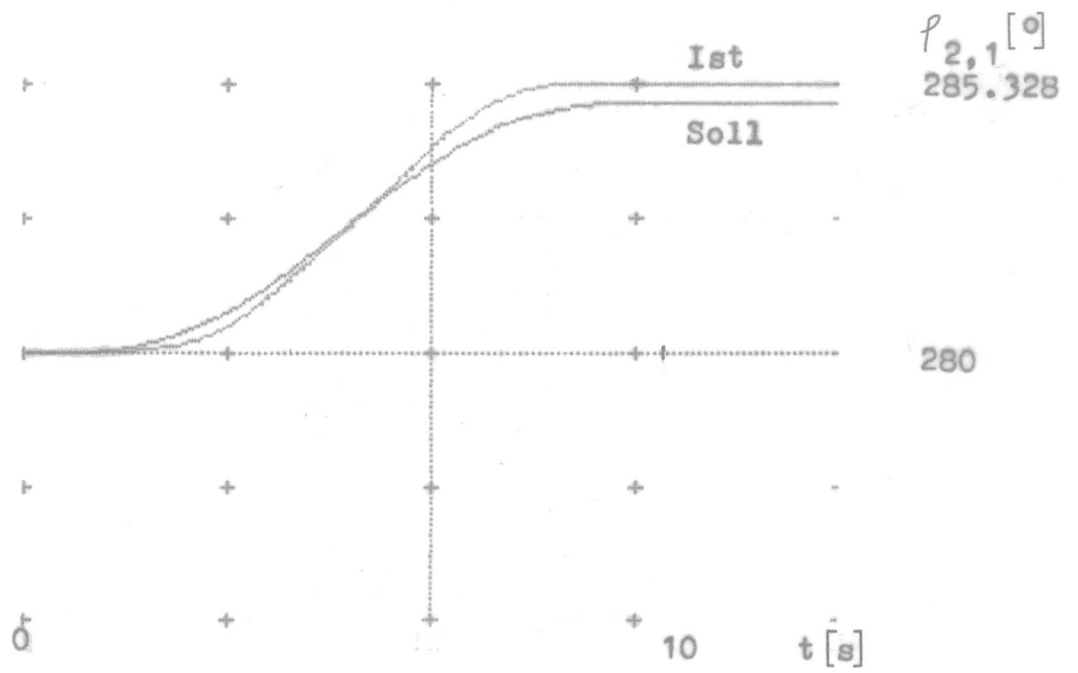
$U_{2,1} [V]$

-3.26

$P [MPa]$

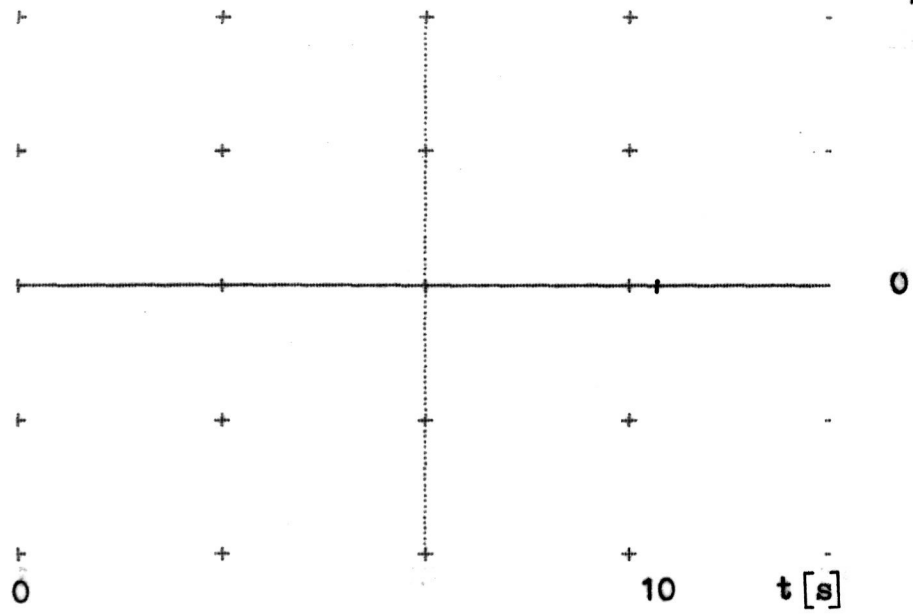
20



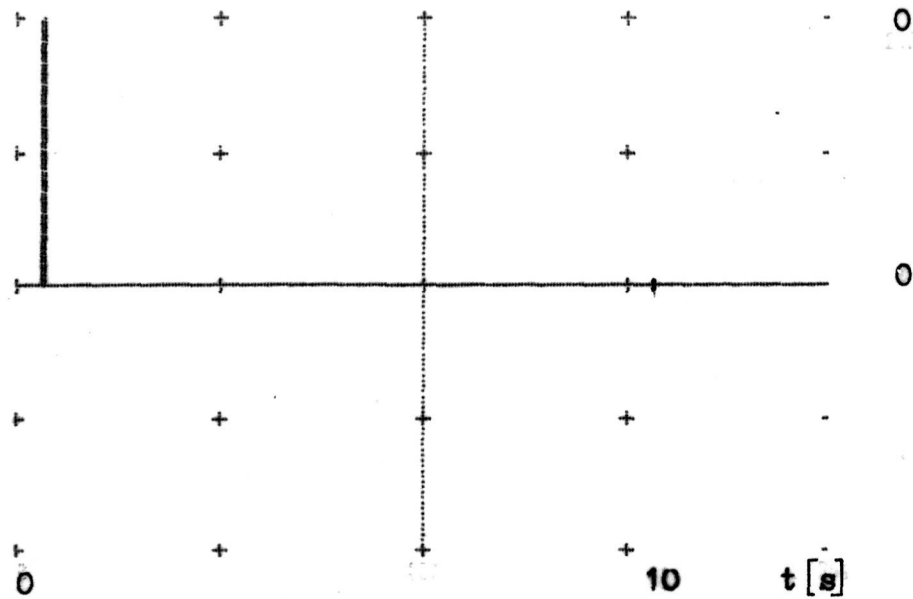


Anlage 4 - 3

$\varphi_{S1} [^\circ]$



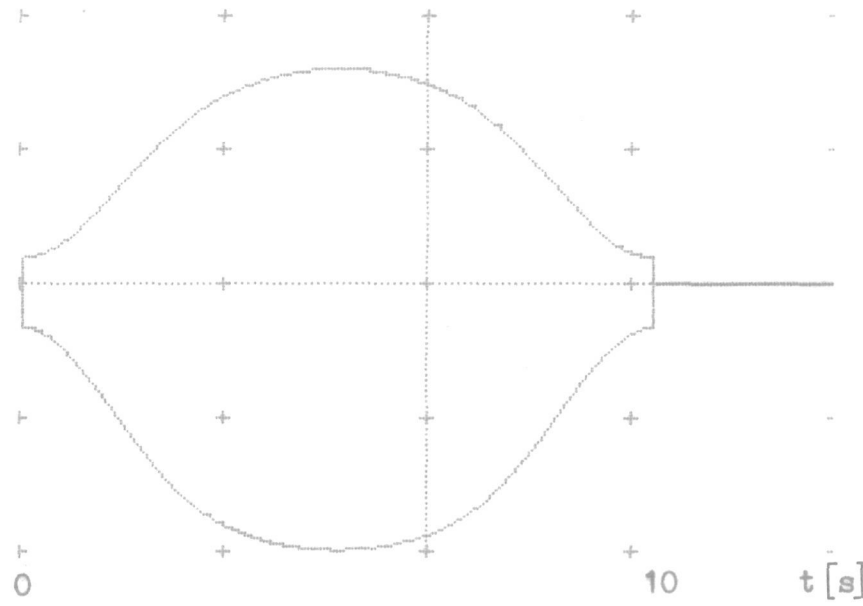
$\varphi_{Tr} [^\circ]$
0.088



Anlage 4 - 3

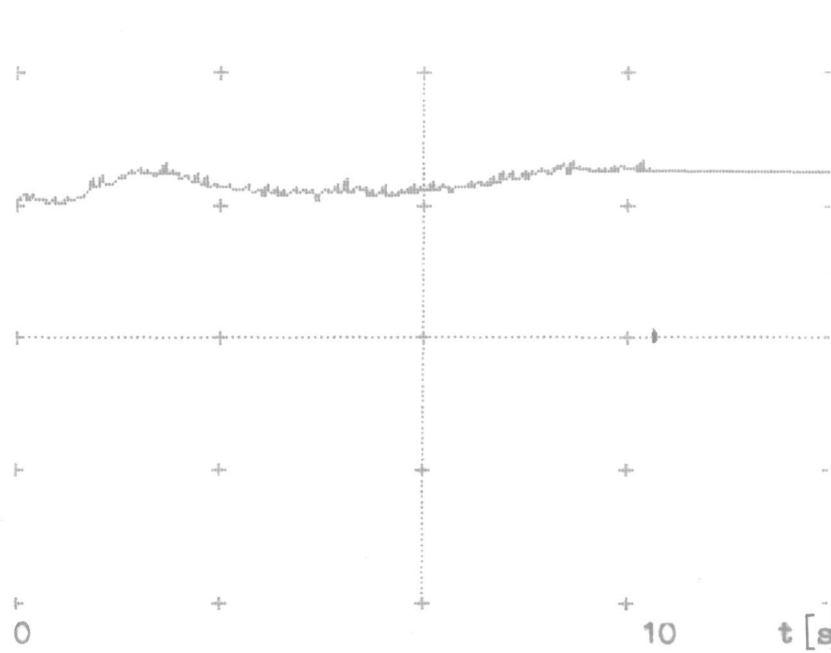
$U_{5,4} [V]$

3.55



$U_{2,1} [V]$

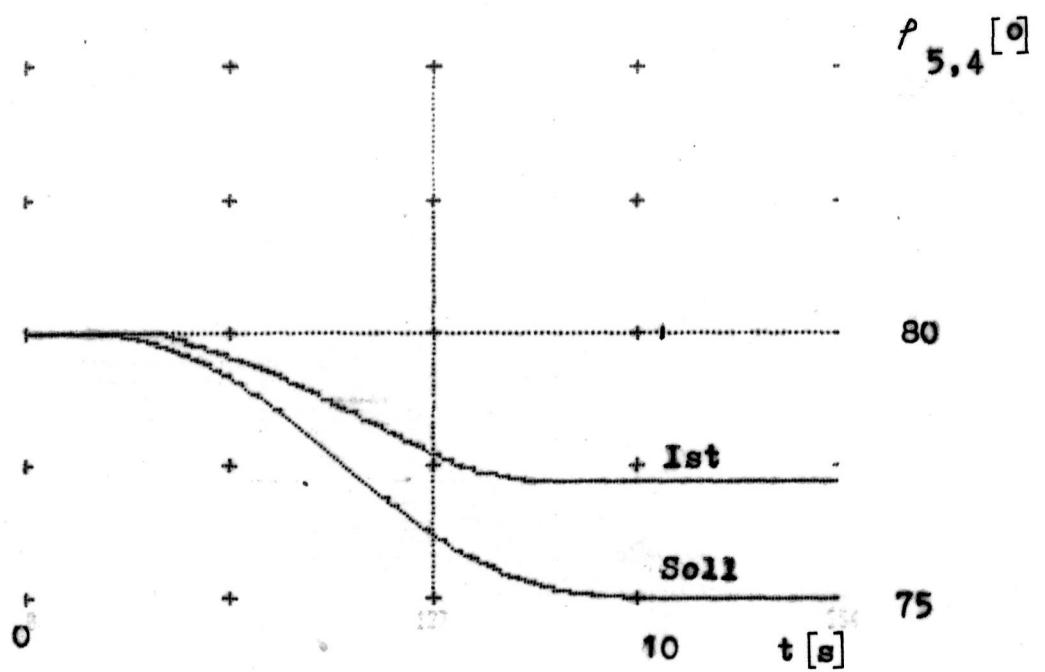
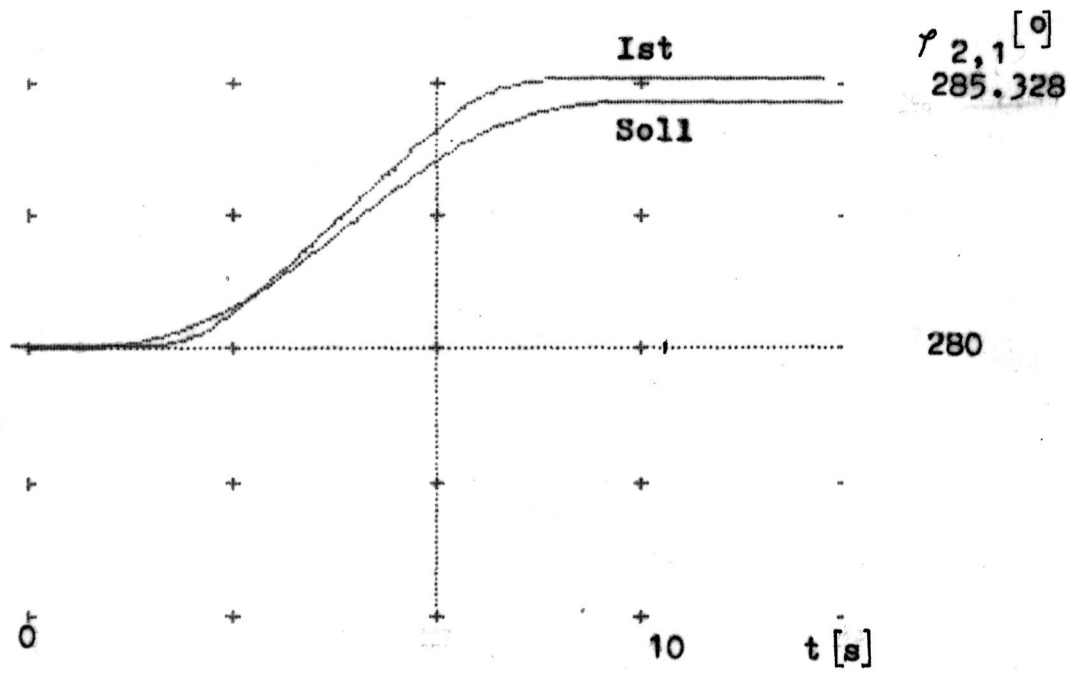
-3.55



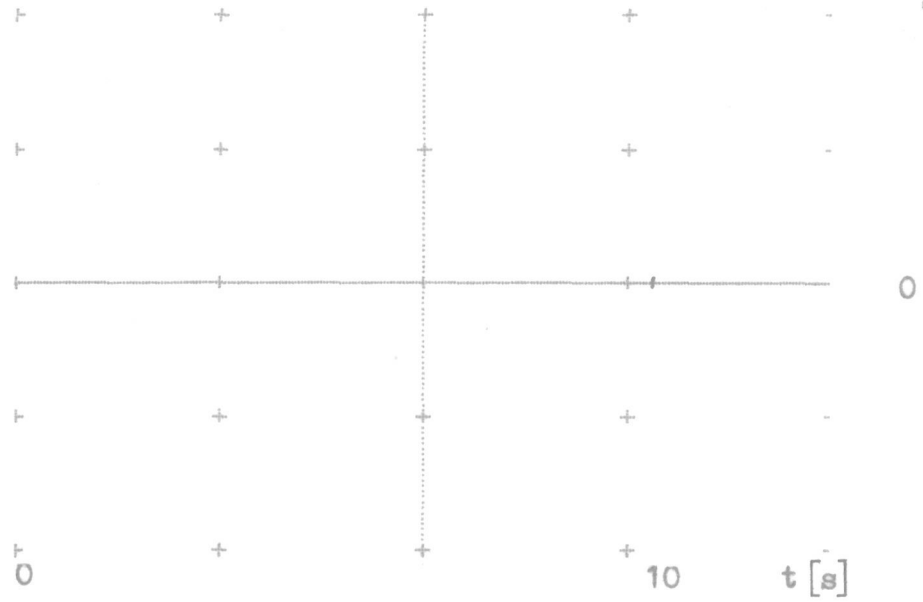
$p [MPa]$

20

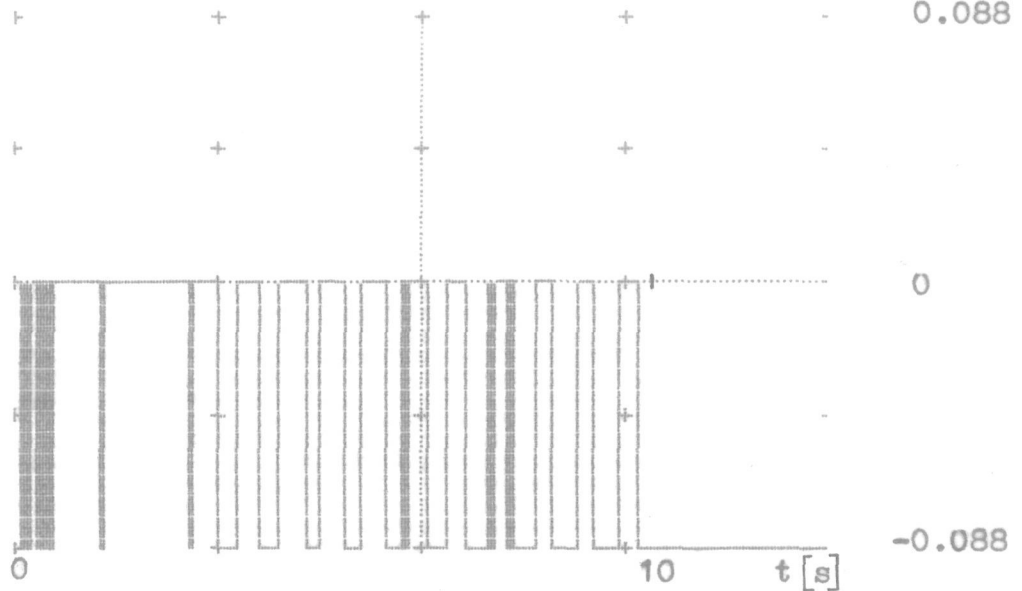
0



$\varphi_{S1} [^\circ]$

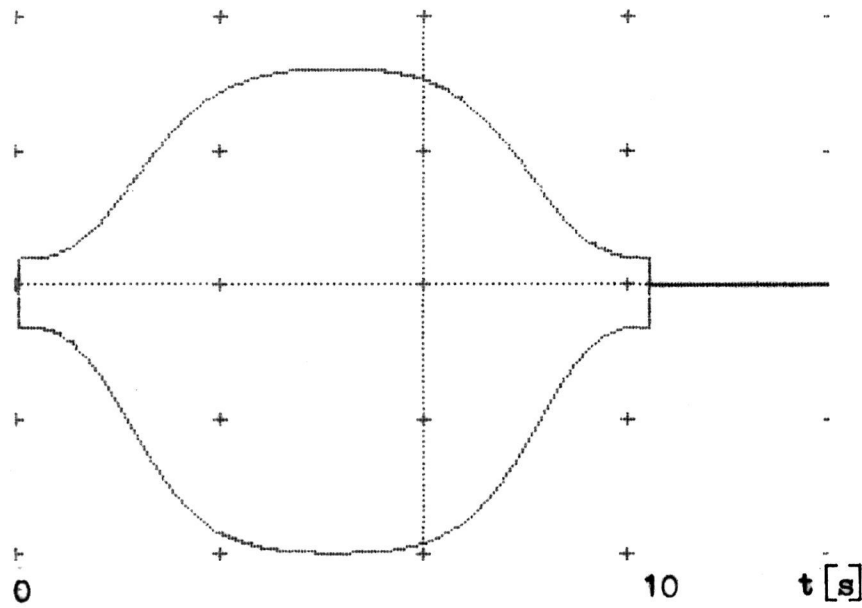


$\varphi_{Tr} [^\circ]$
0.088



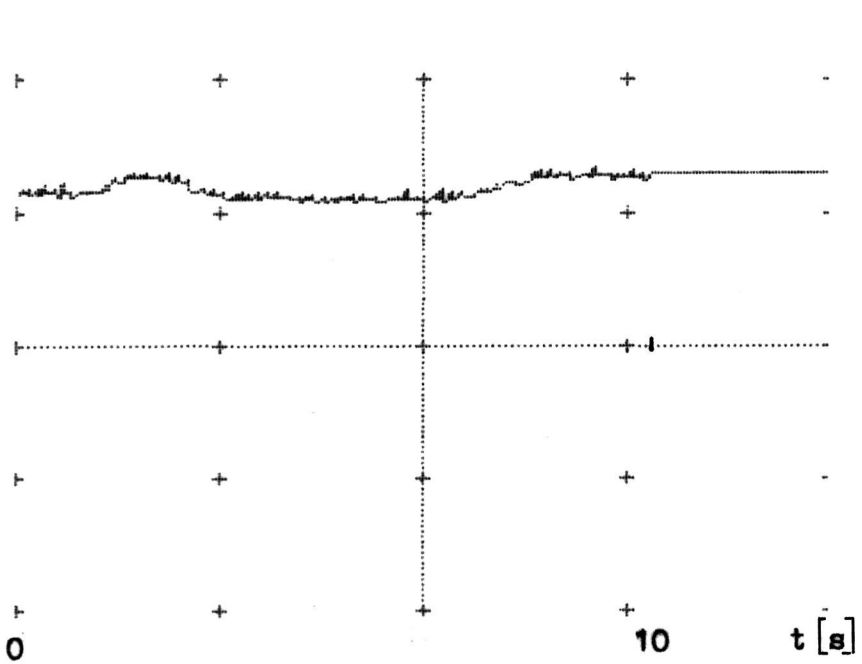
$U_{5,4} [V]$

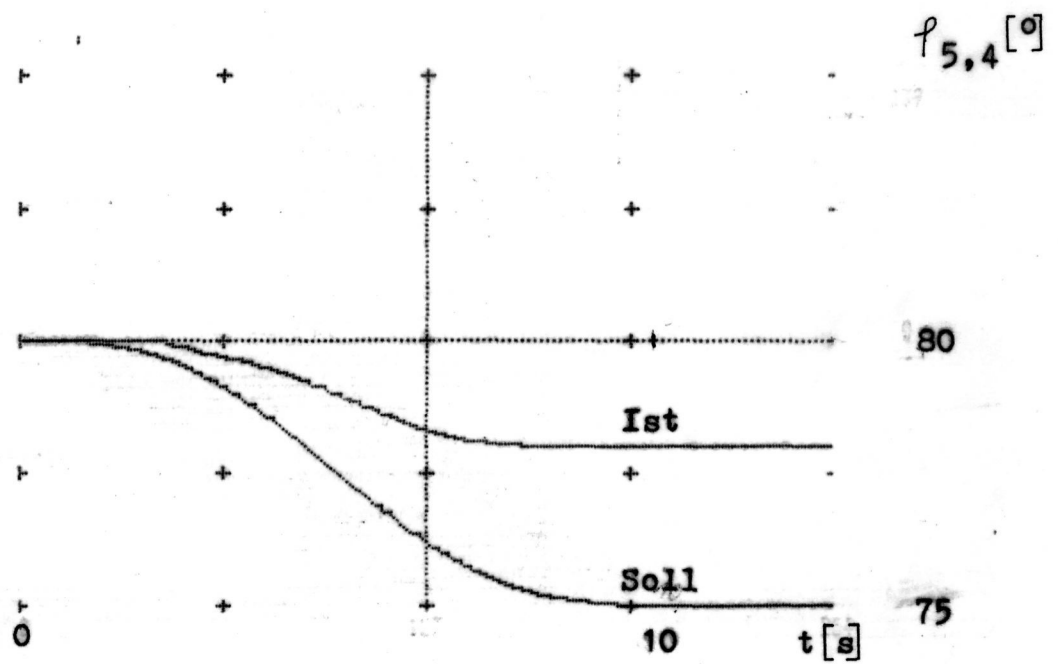
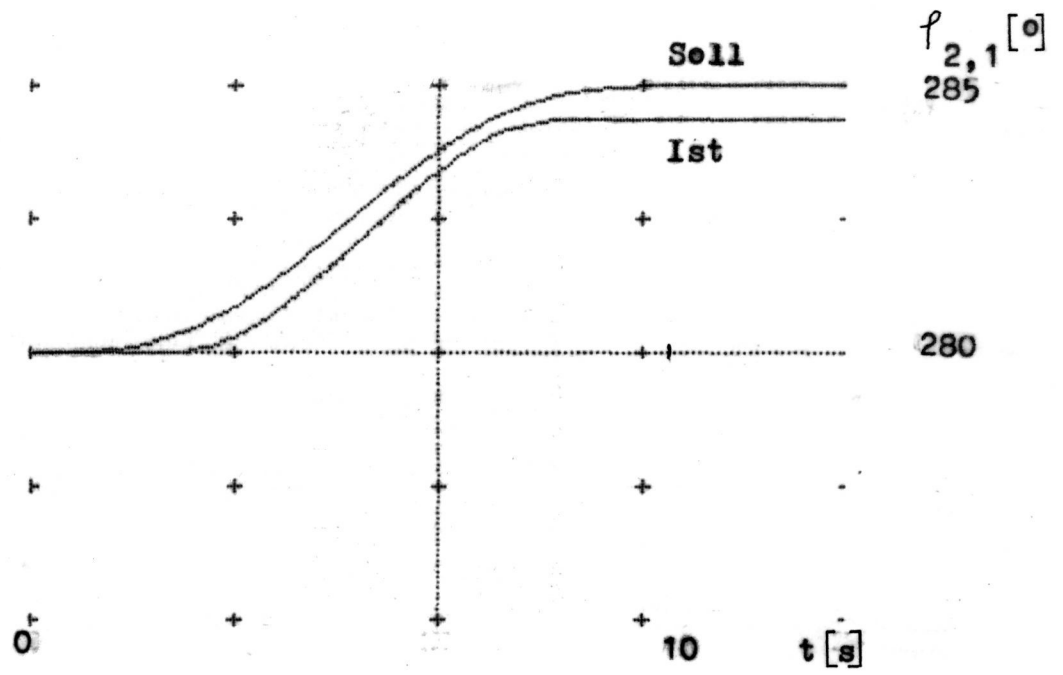
3.55



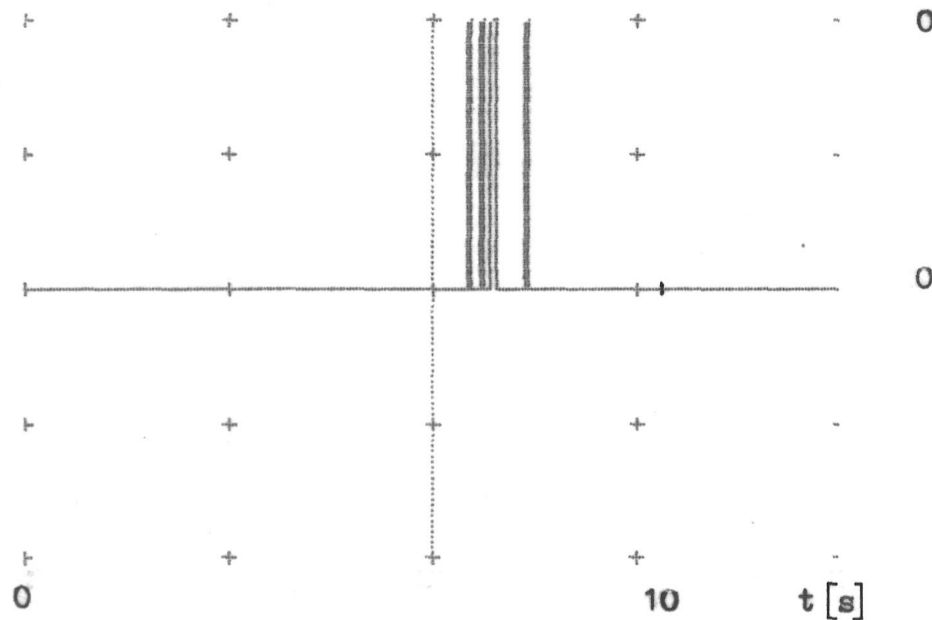
$U_{2,1} [V]$

-3.55

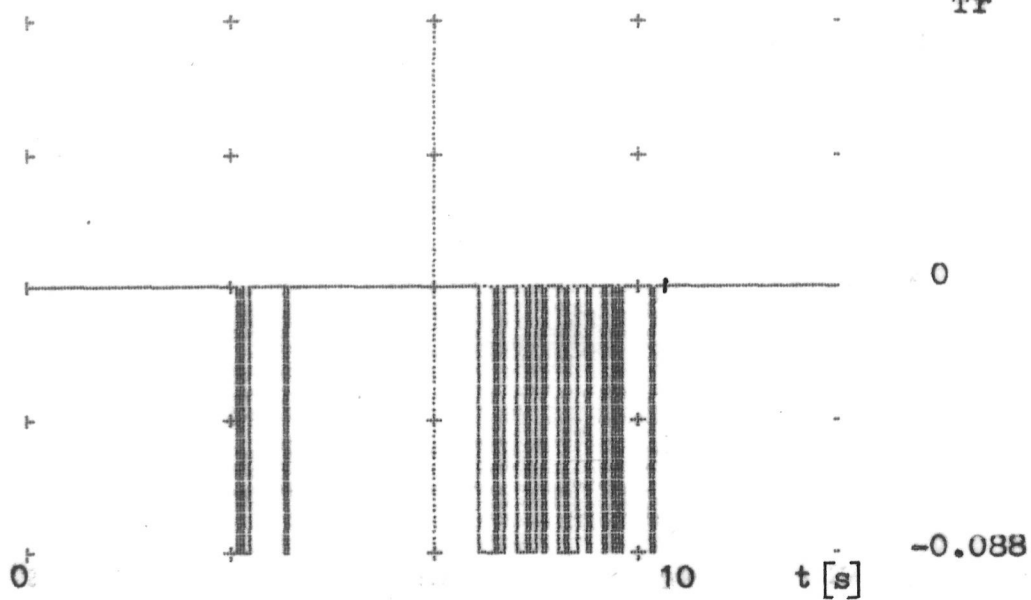




$\varphi_{S1} [^\circ]$
0.088

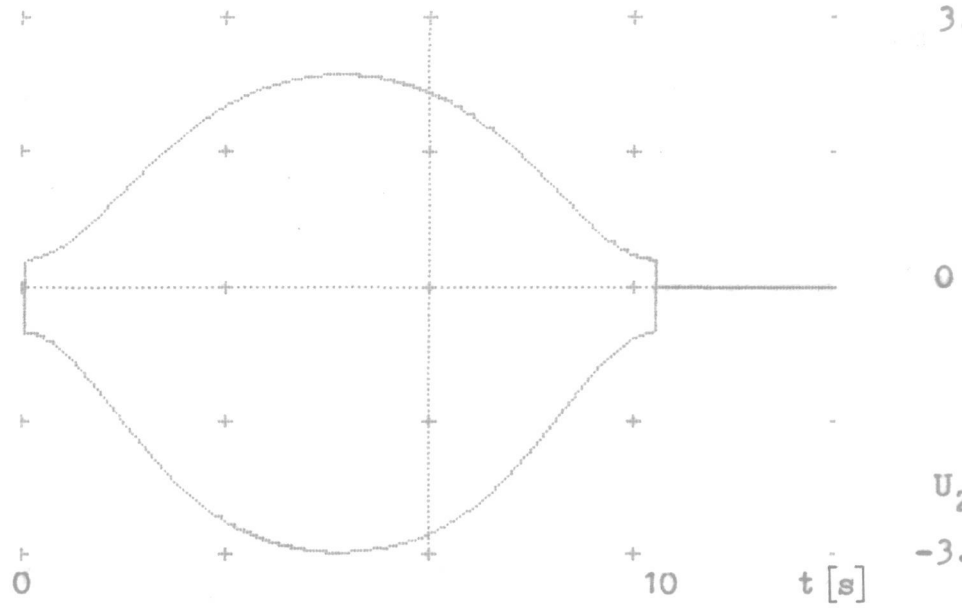


$\varphi_{Tr} [^\circ]$



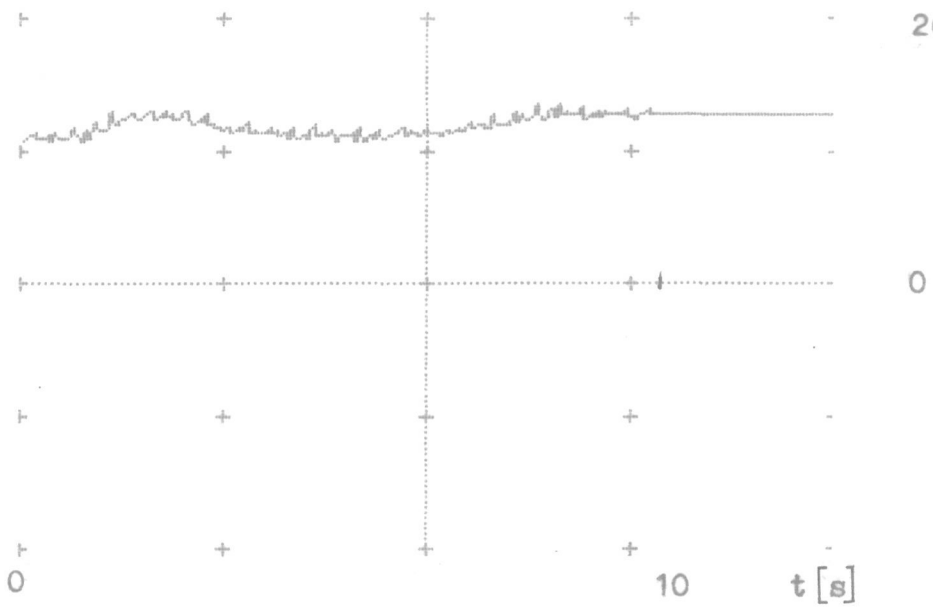
$U_{5,4} [V]$

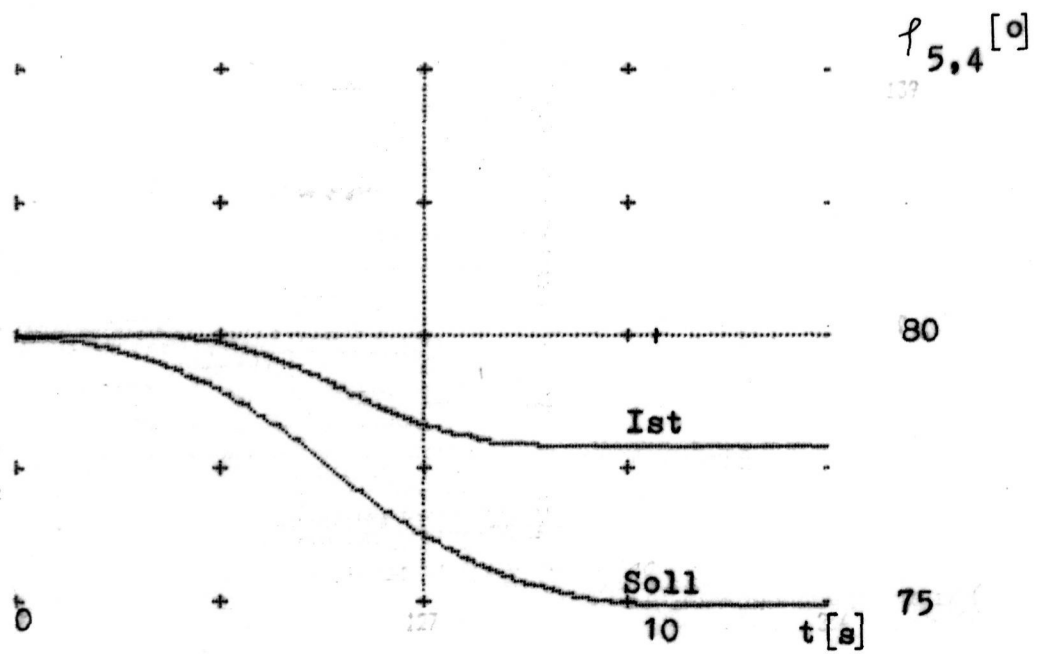
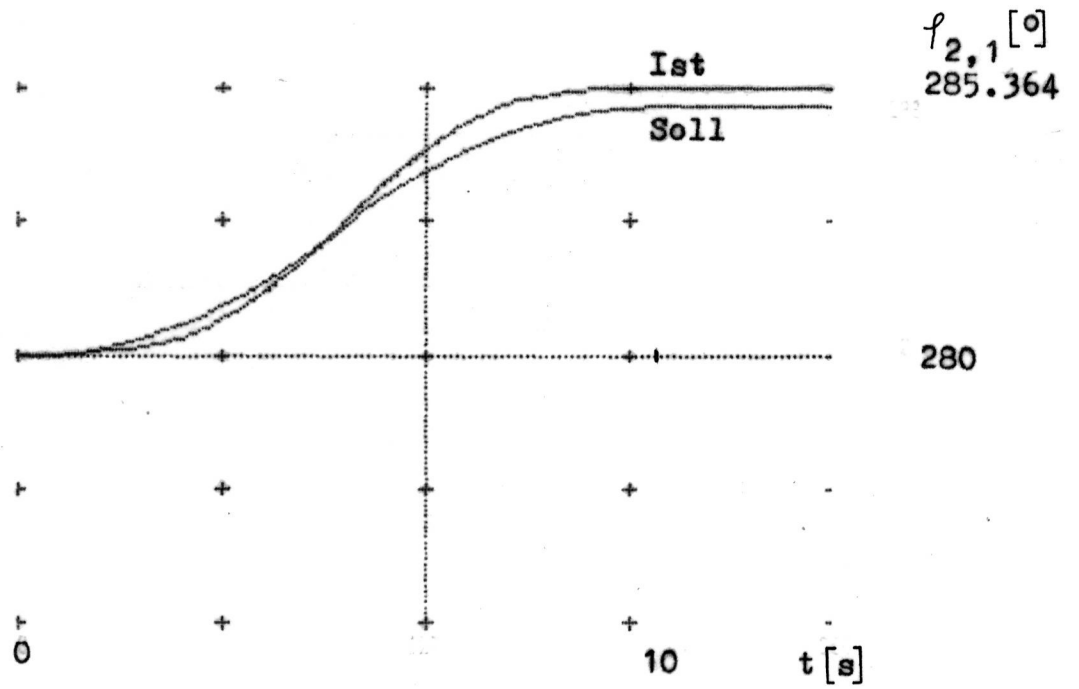
3.37



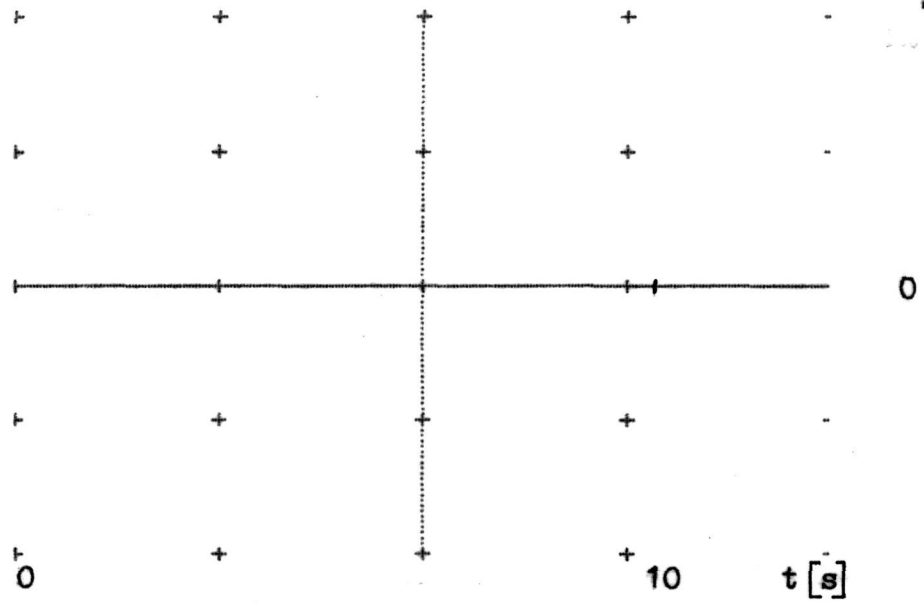
$p [MPa]$

20

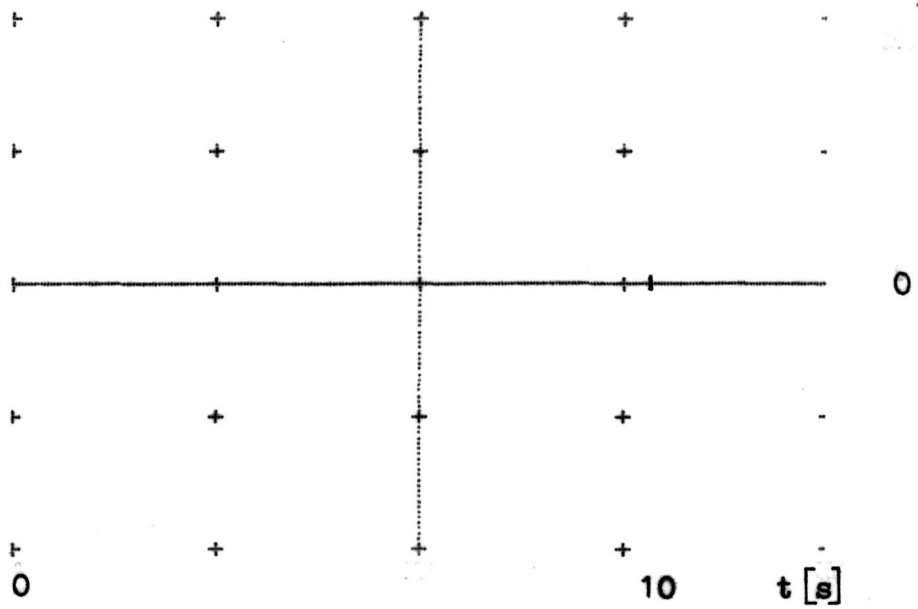




$\varphi_{s1} [^\circ]$

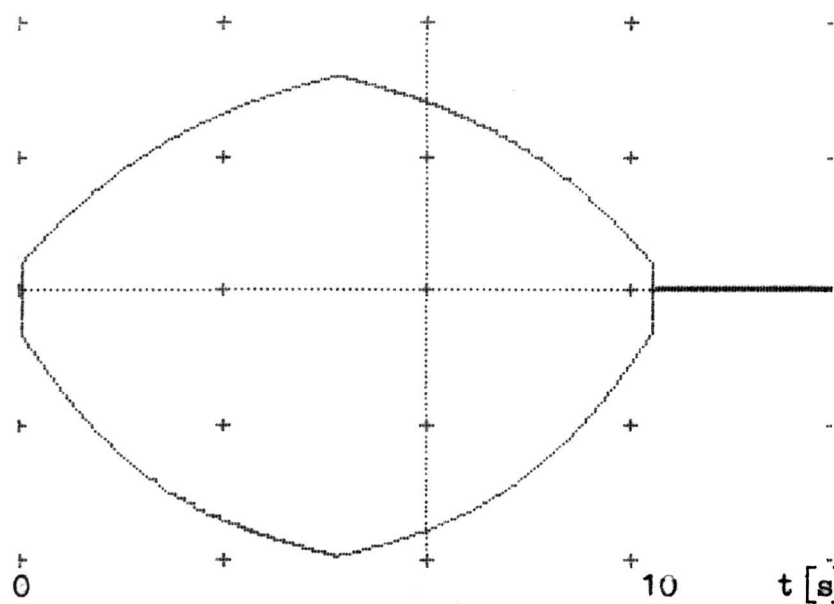


$\varphi_{Tr} [^\circ]$



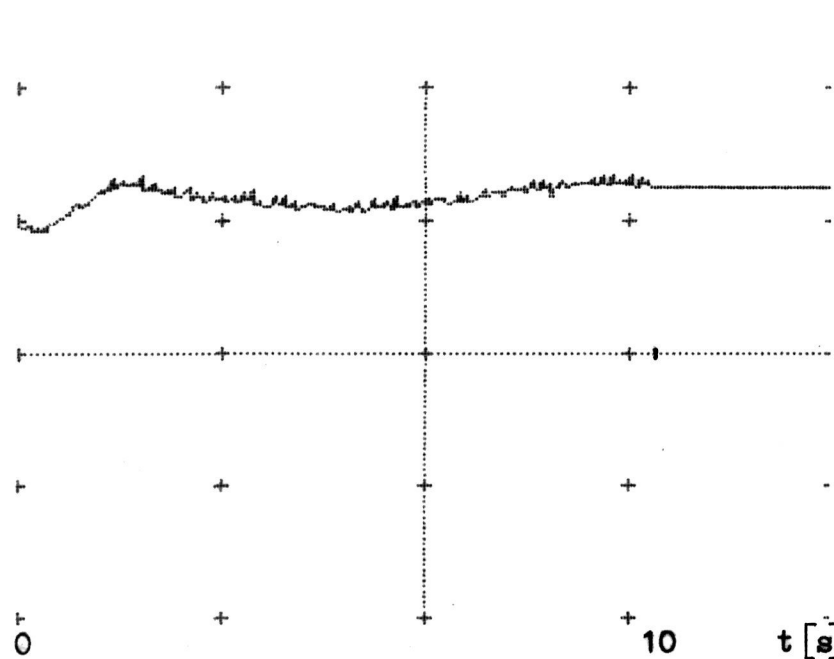
$U_{5,4} [V]$

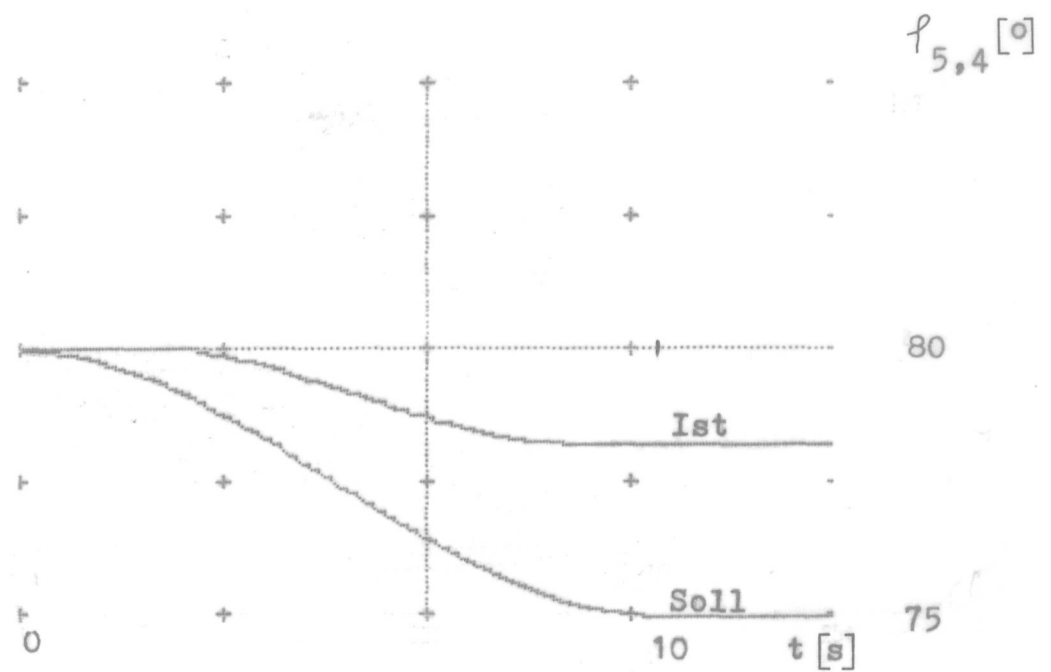
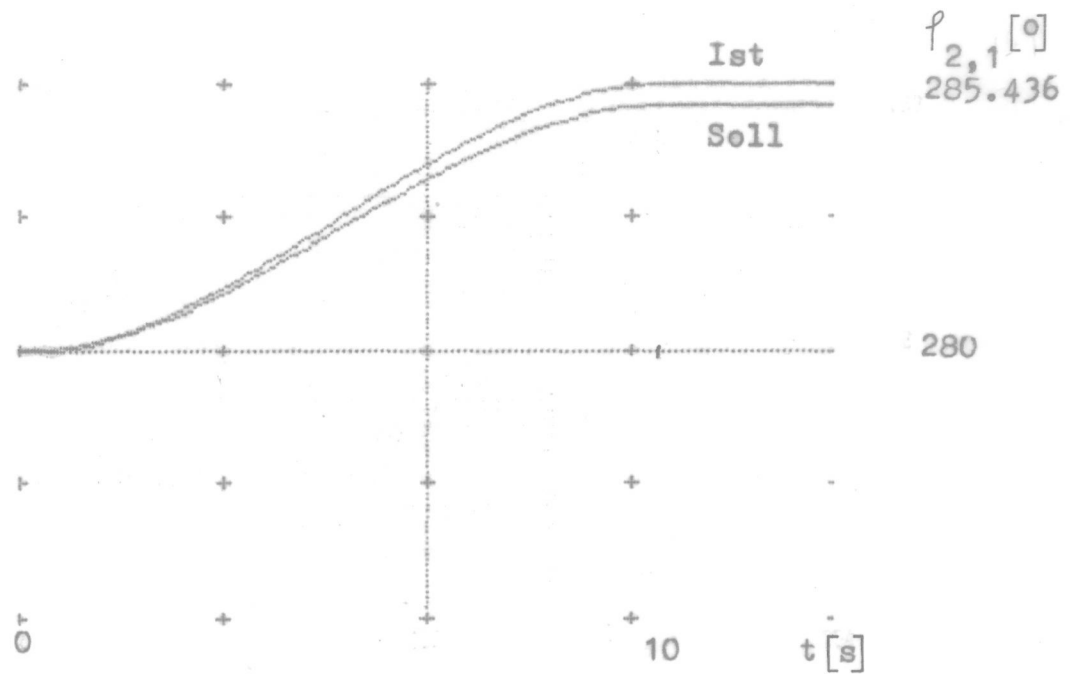
3.54



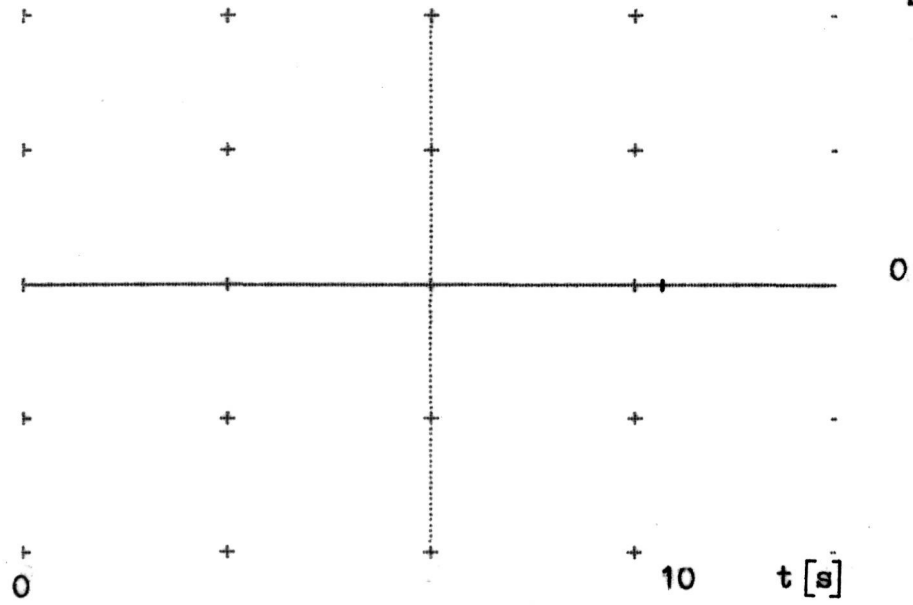
$U_{2,1} [V]$

-3.54

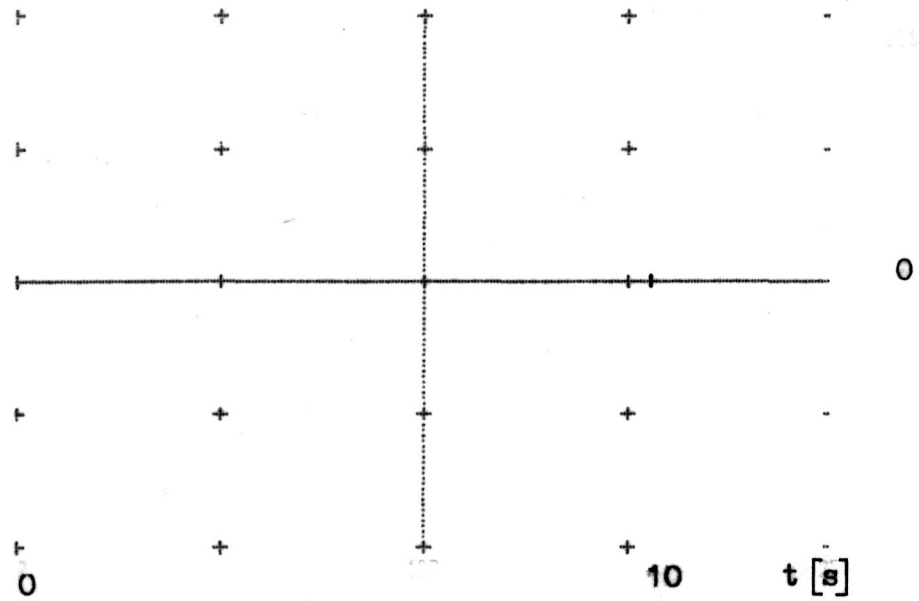




$\varphi_{S1} [^\circ]$

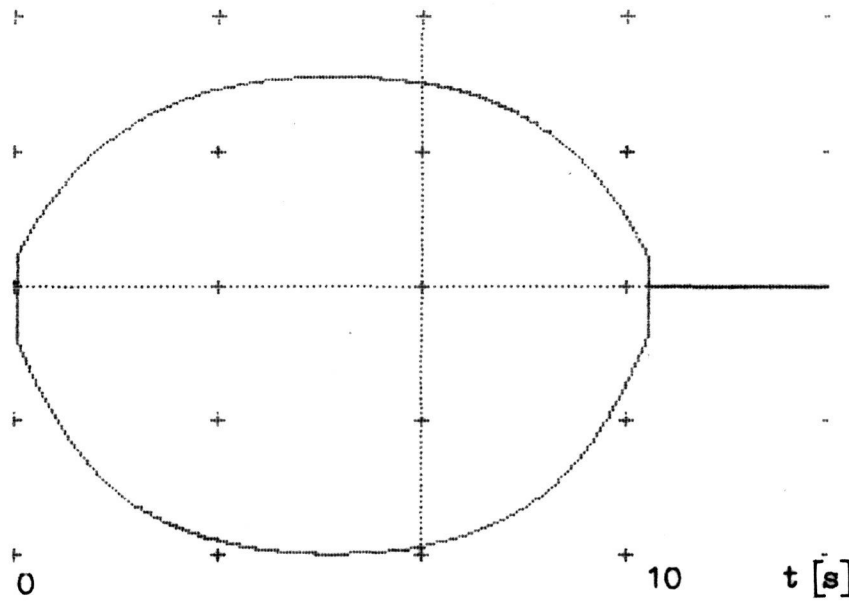


$\varphi_{Tr} [^\circ]$



$U_{5,4} [V]$

3.26

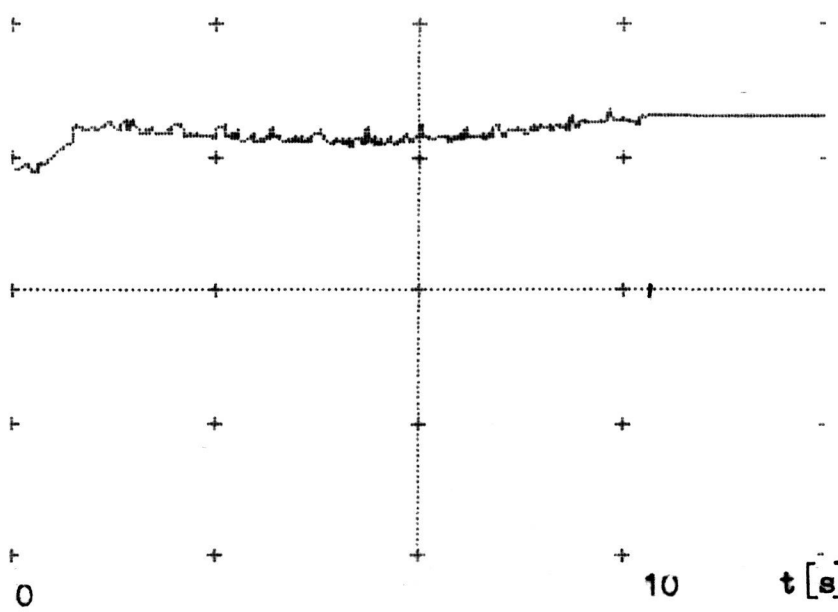


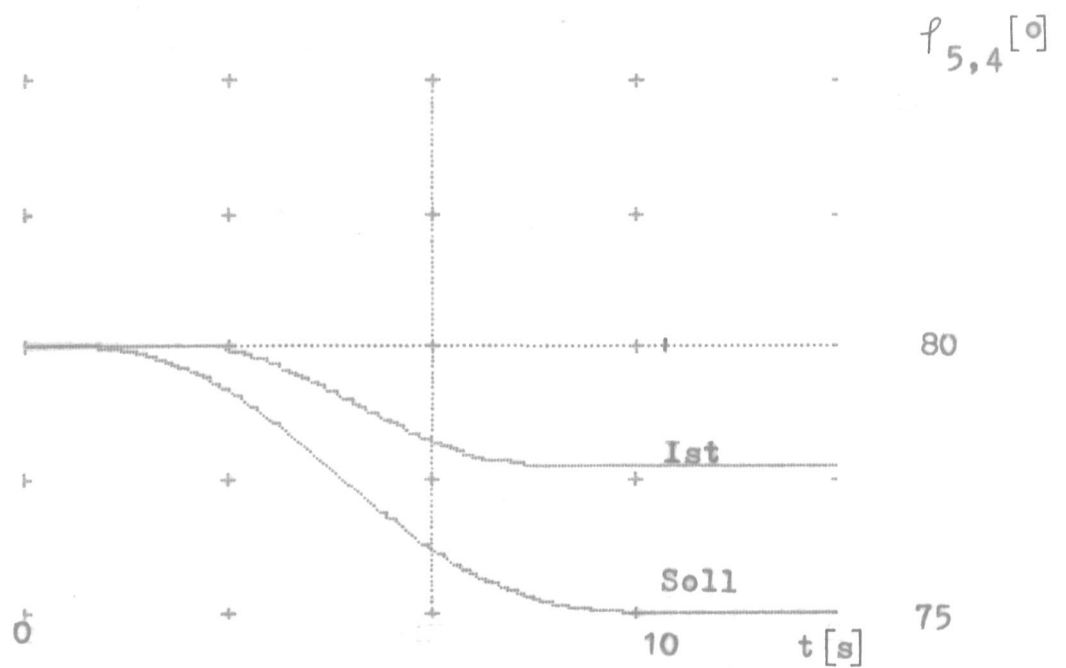
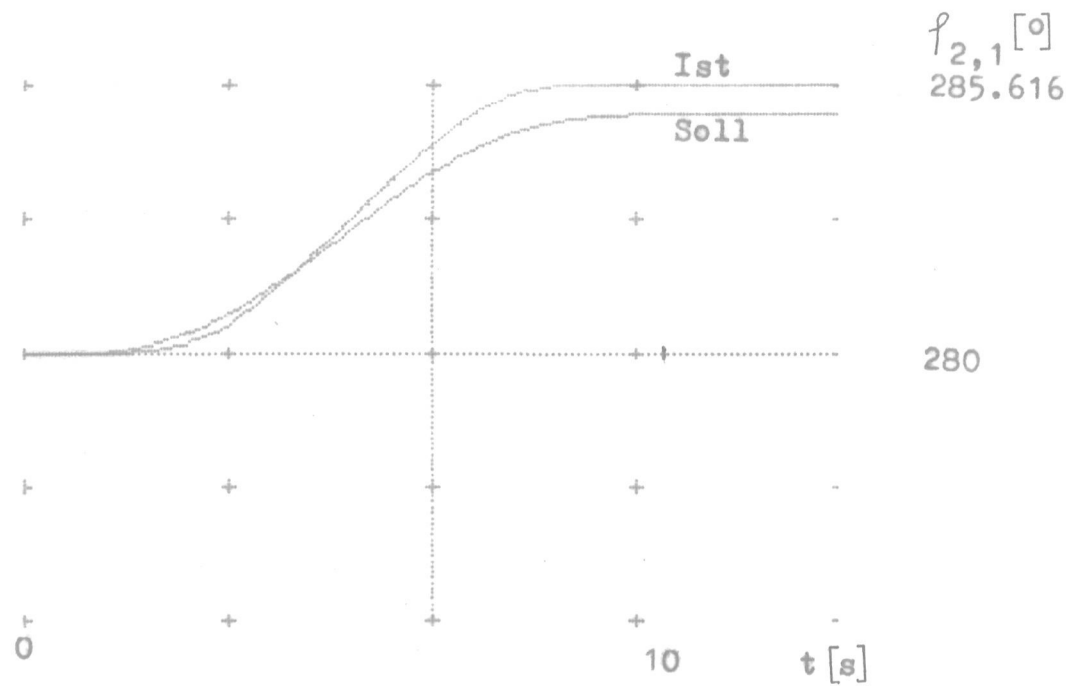
$U_{2,1} [V]$

-3.26

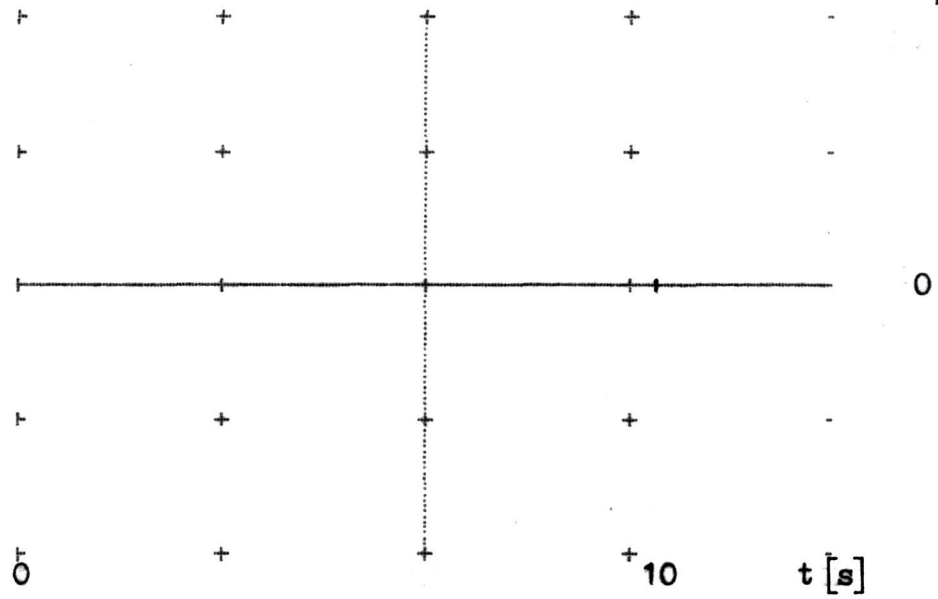
$p [MPa]$

20

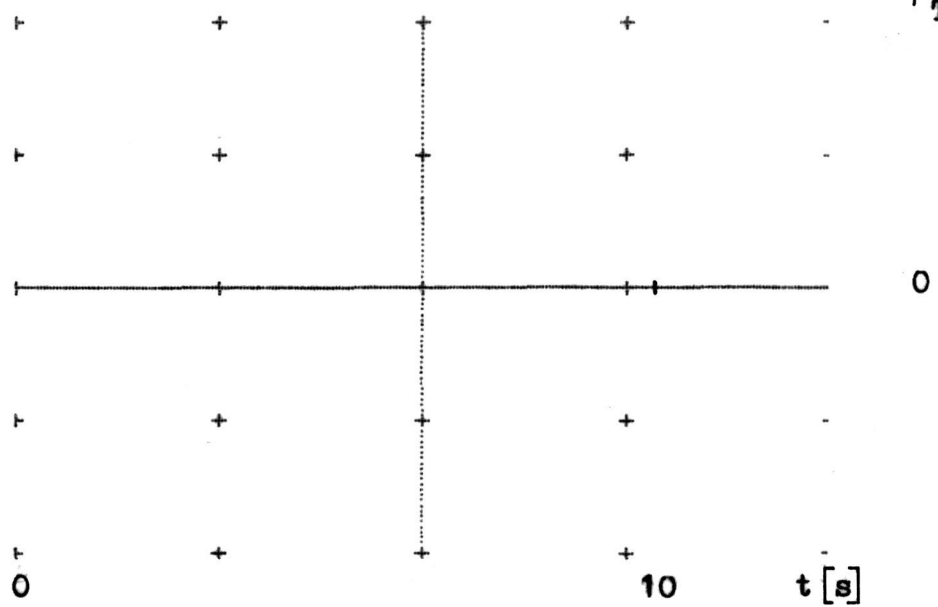




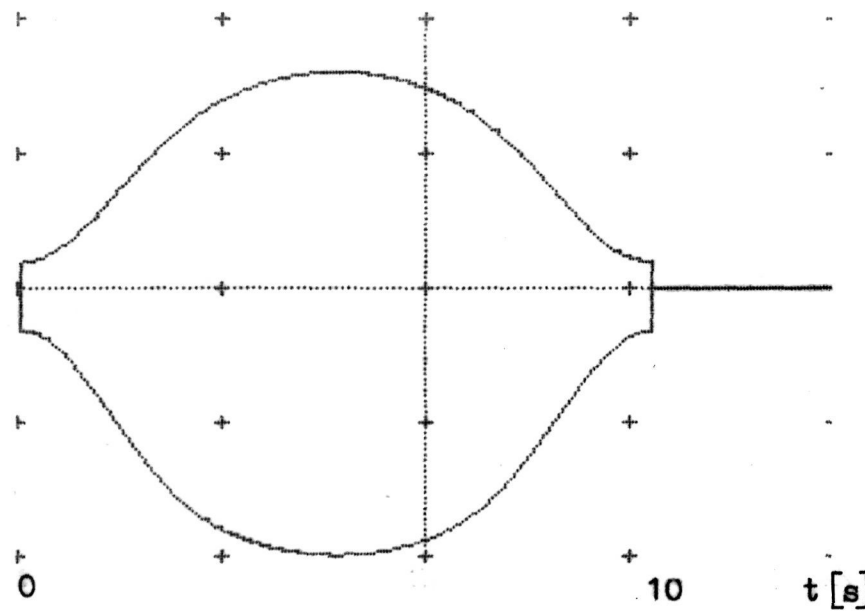
$\varphi_{Sl} [^\circ]$



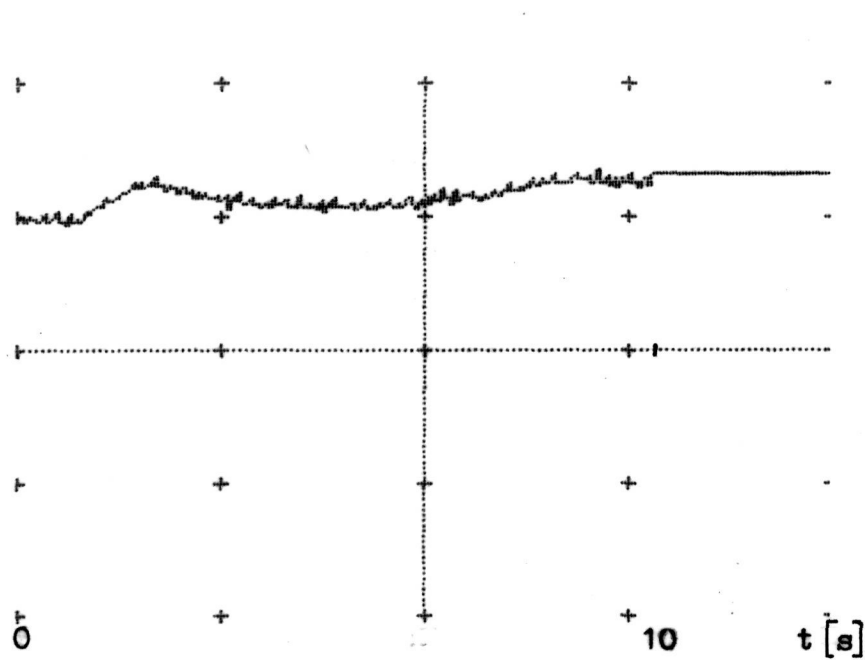
$\varphi_{Tr} [^\circ]$

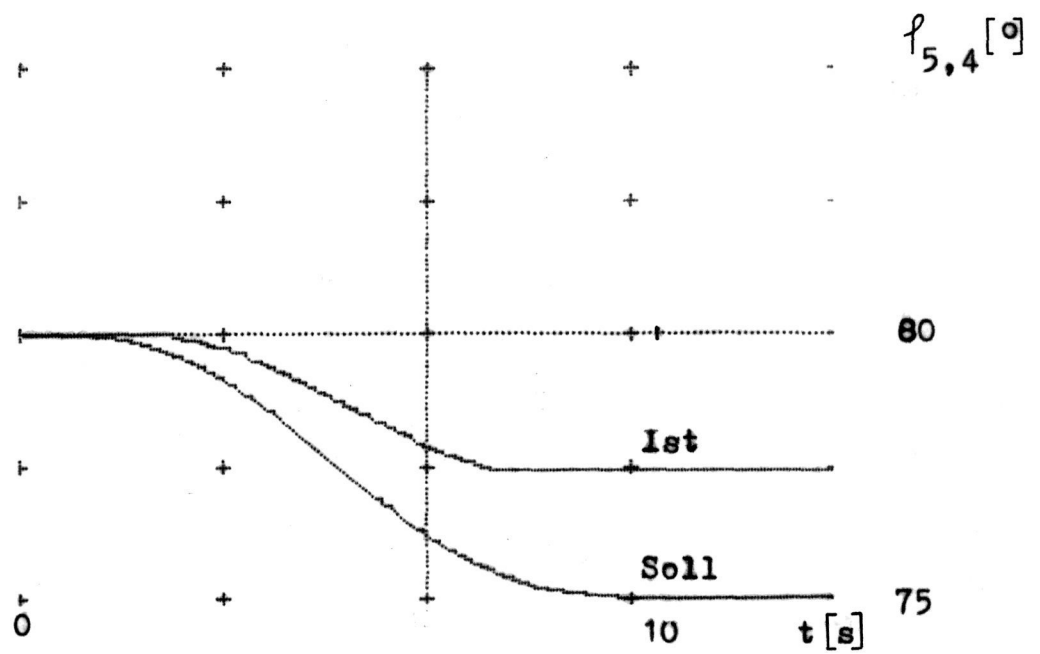
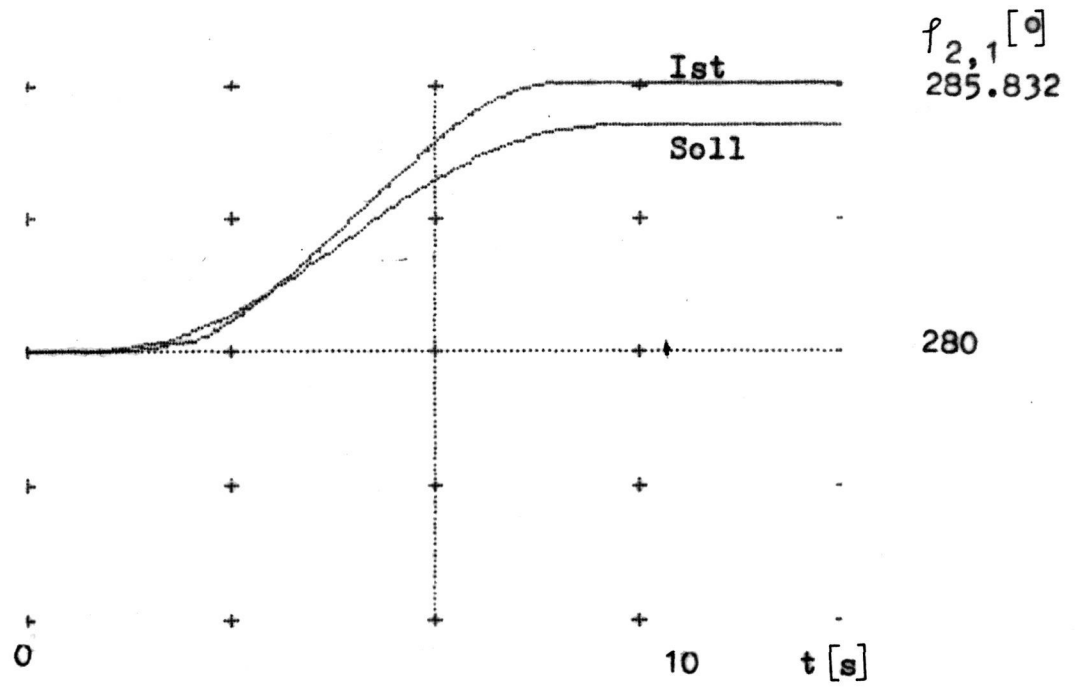


$U_{5,4} [V]$
3.55

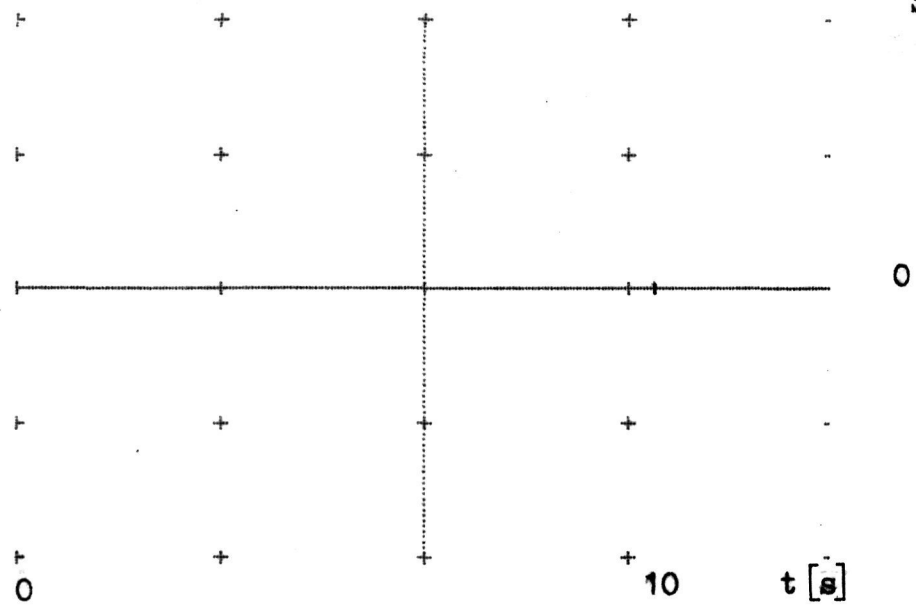


$U_{2,1} [V]$
-3.55

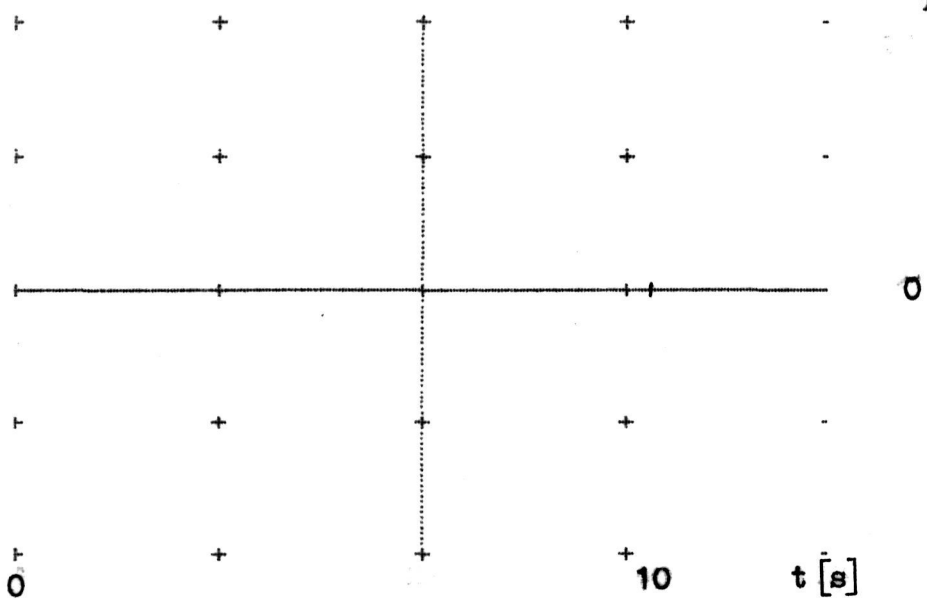




$\varphi_{S1} [^\circ]$

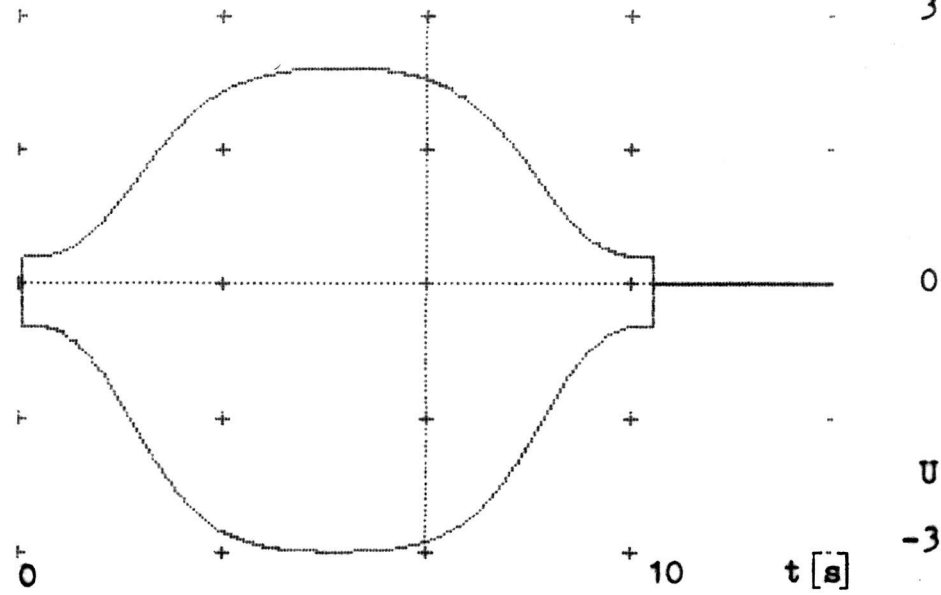


$\varphi_{Tr} [^\circ]$



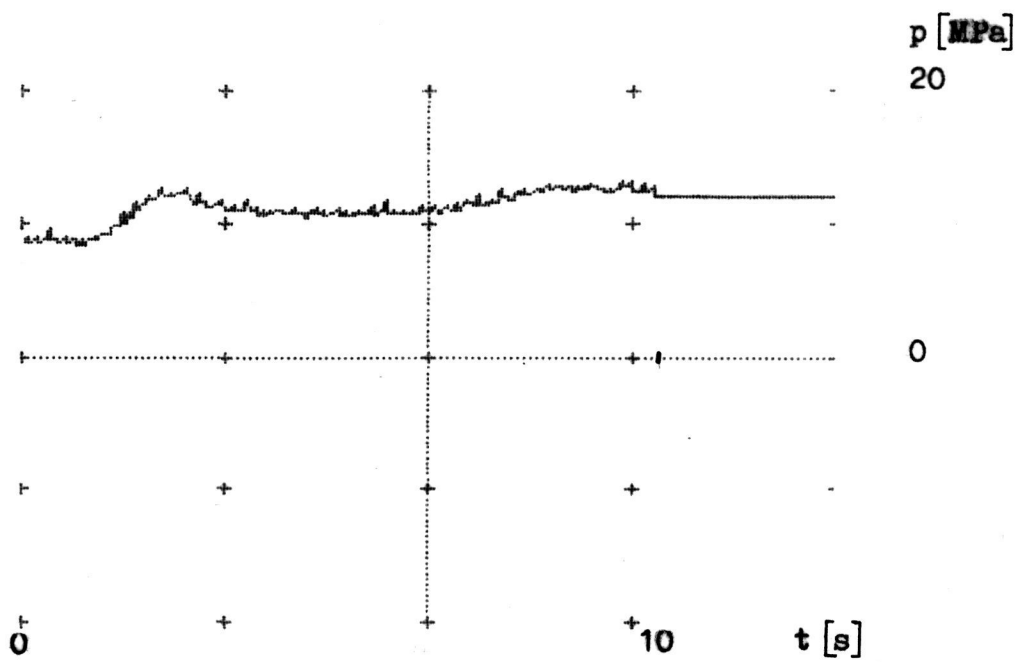
$U_{5,4} [V]$

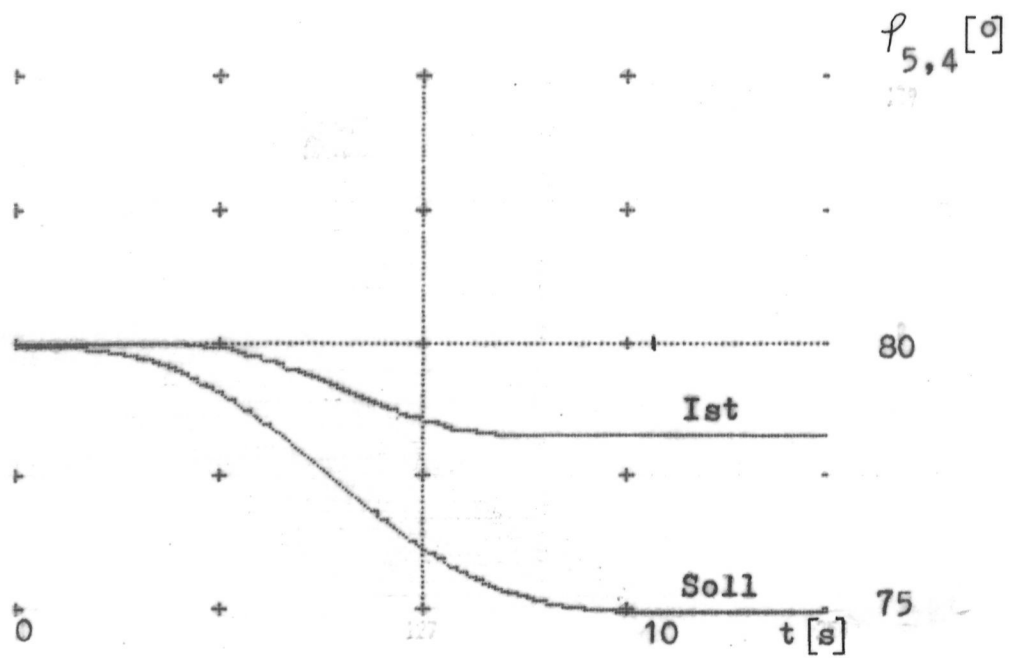
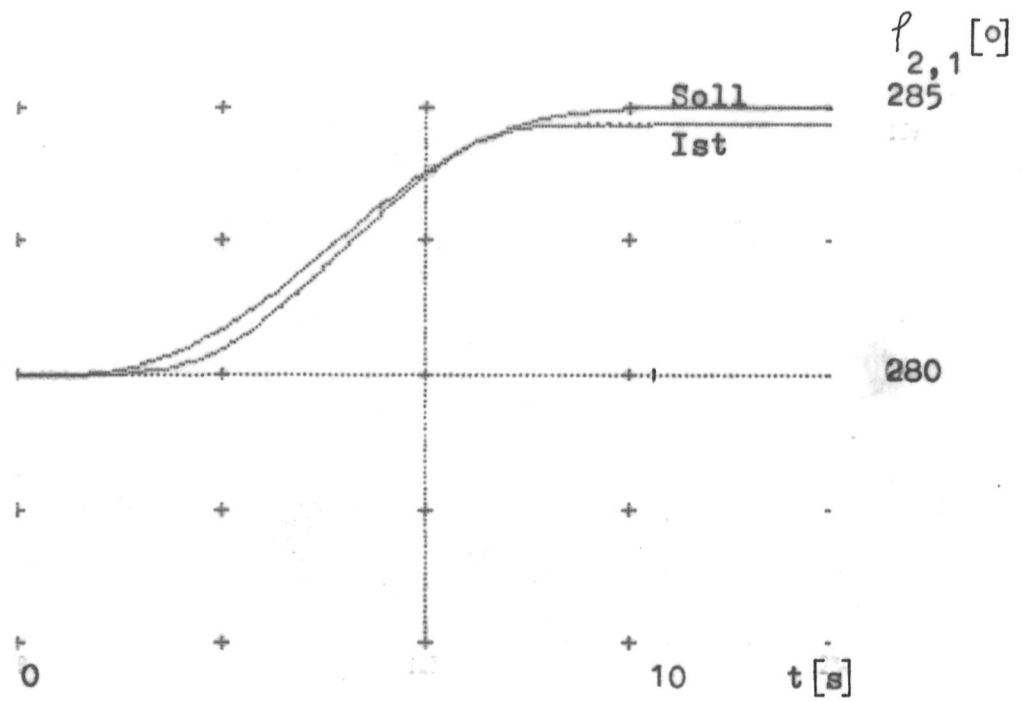
3.55



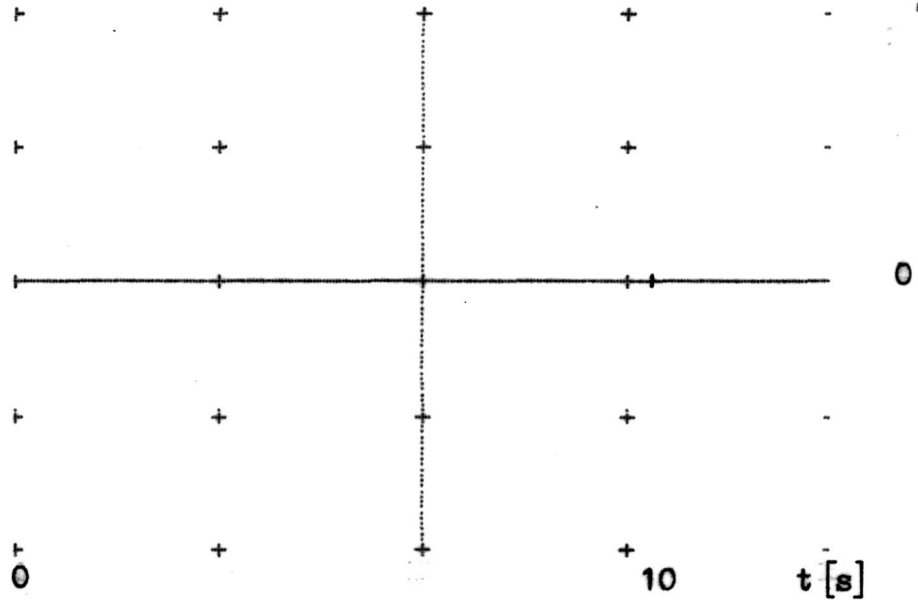
$U_{2,1} [V]$

-3.55

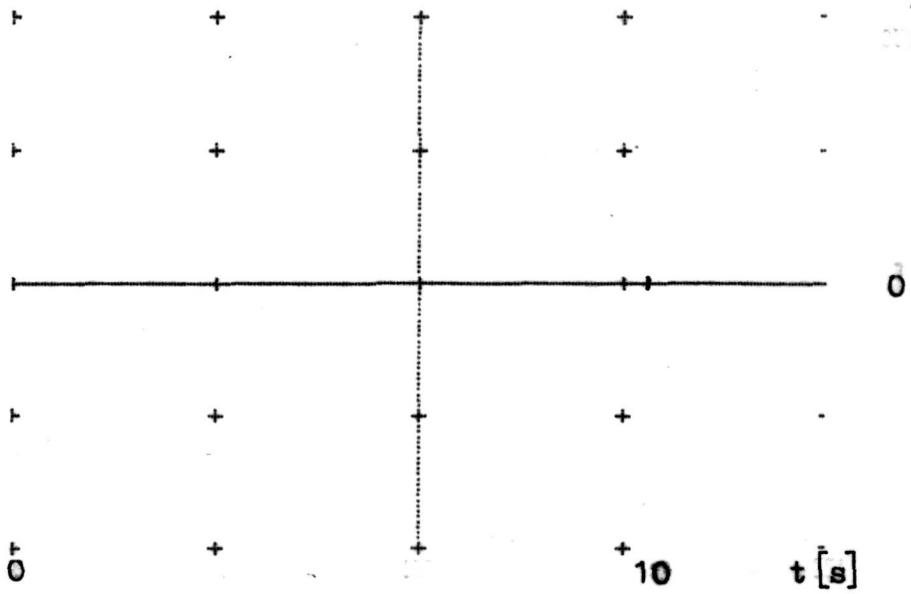




$\varphi_{S1} [^\circ]$

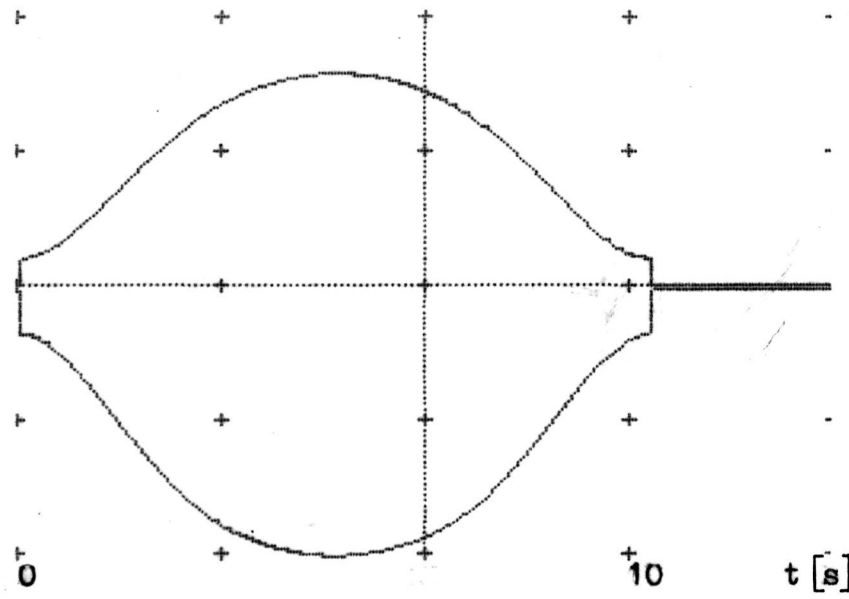


$\varphi_{Tr} [^\circ]$



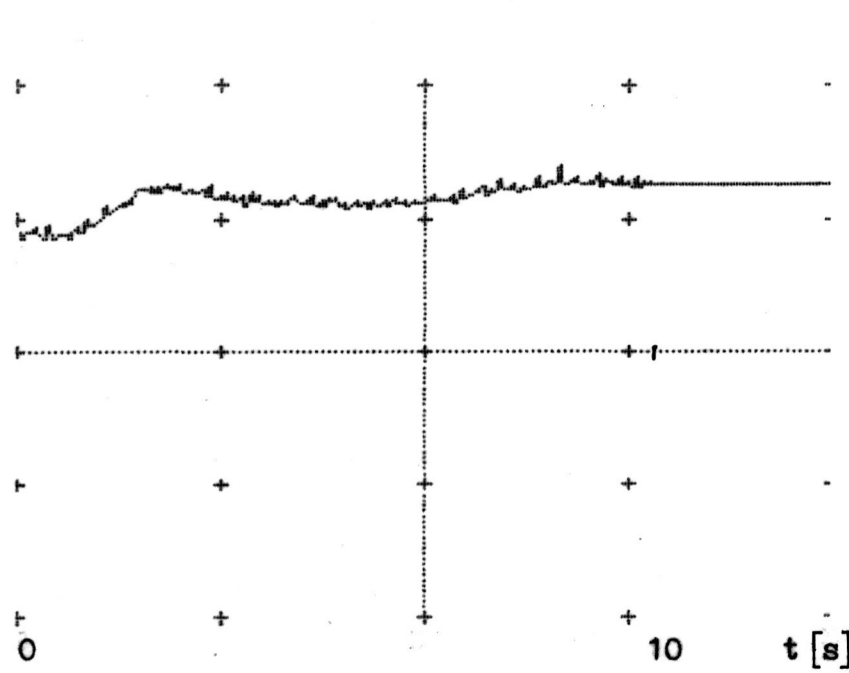
$U_{5,4} [V]$

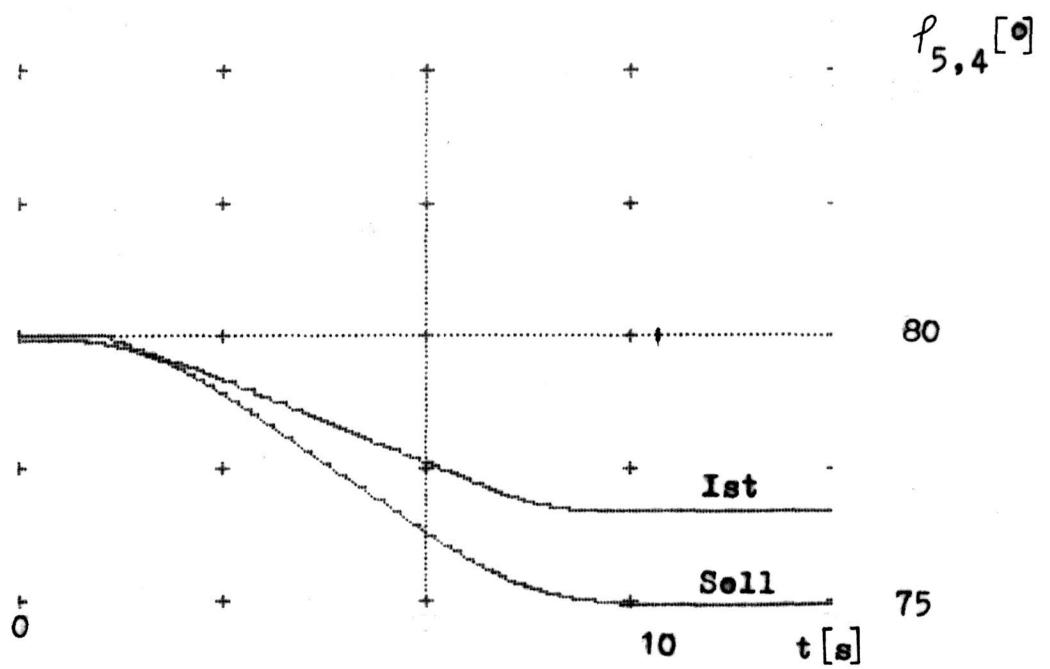
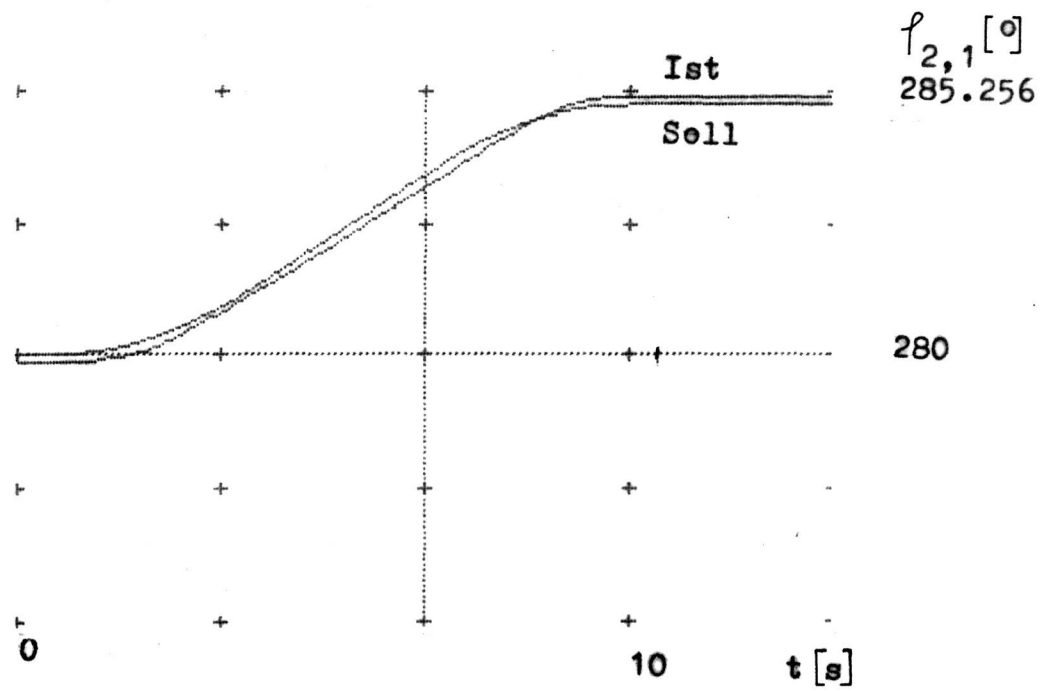
3.37

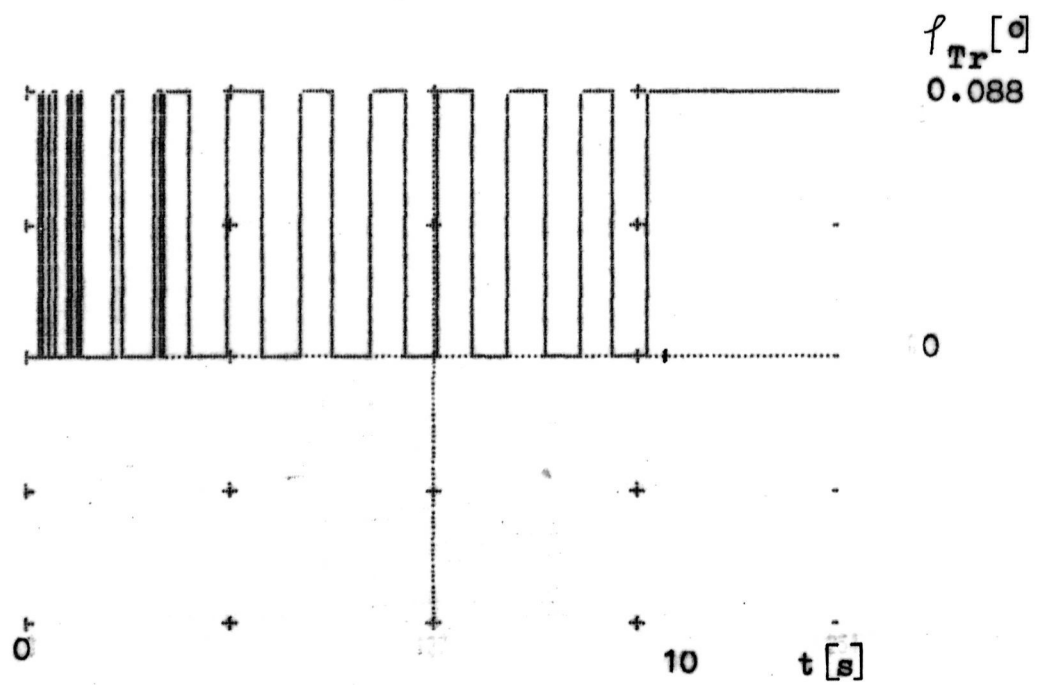
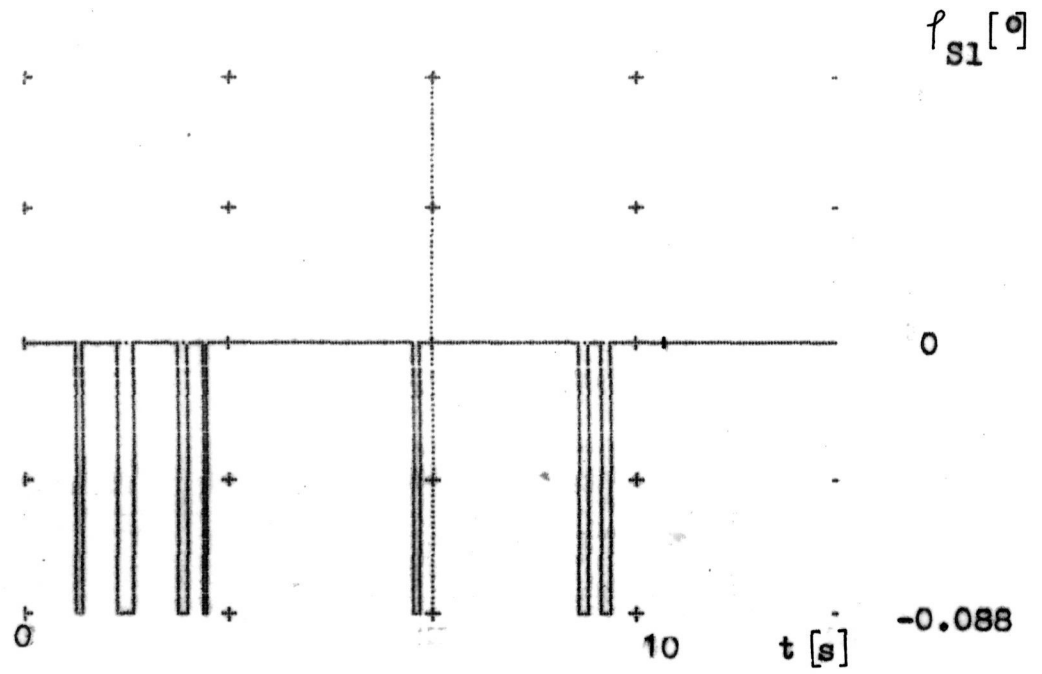


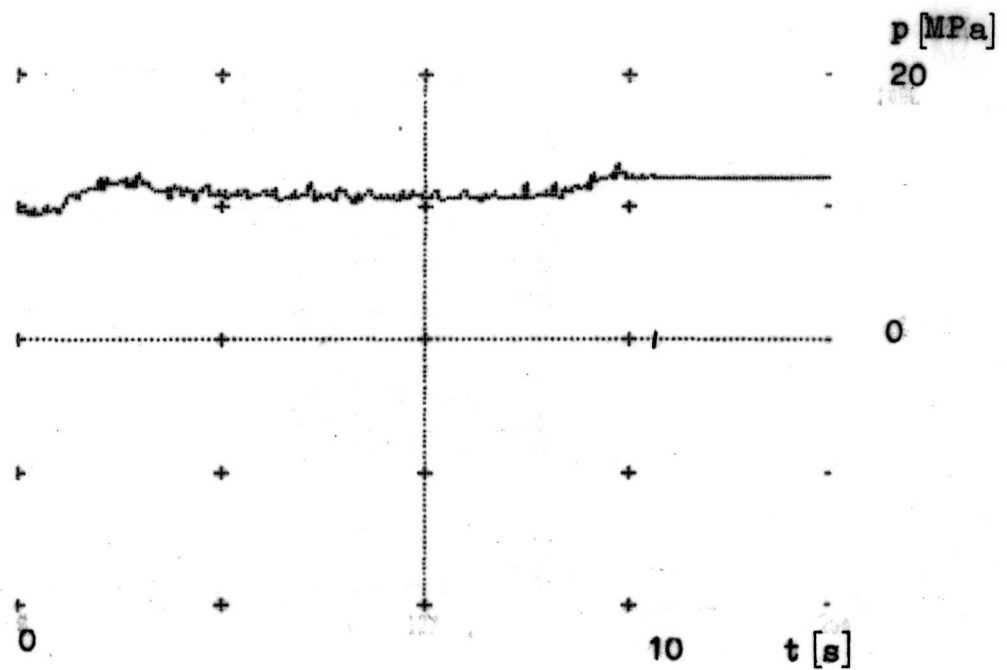
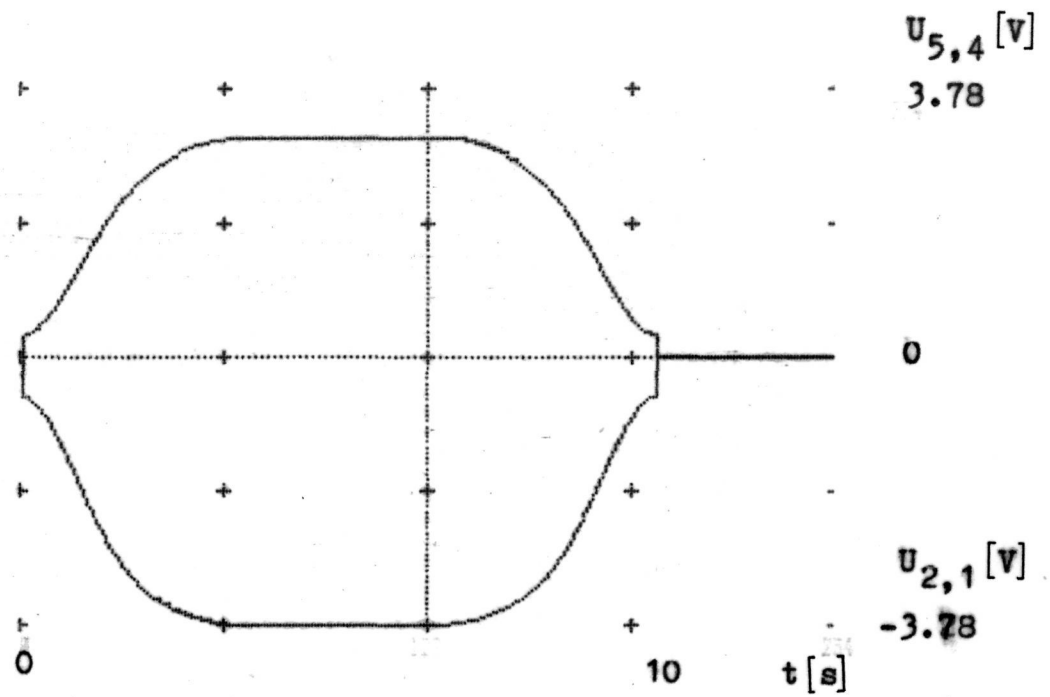
$U_{2,1} [V]$

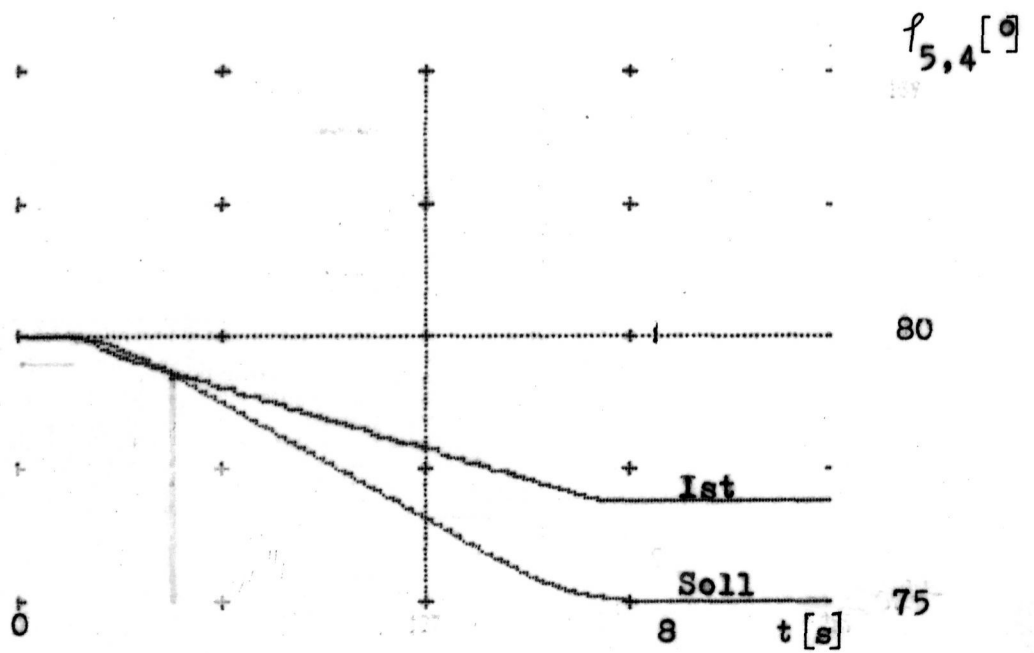
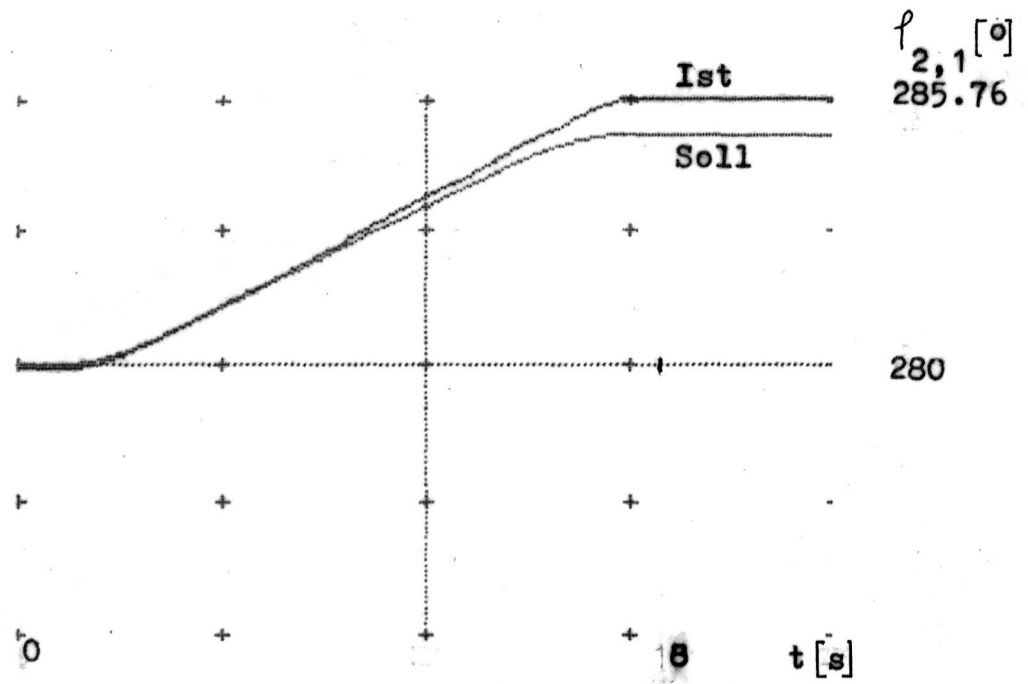
-3.37



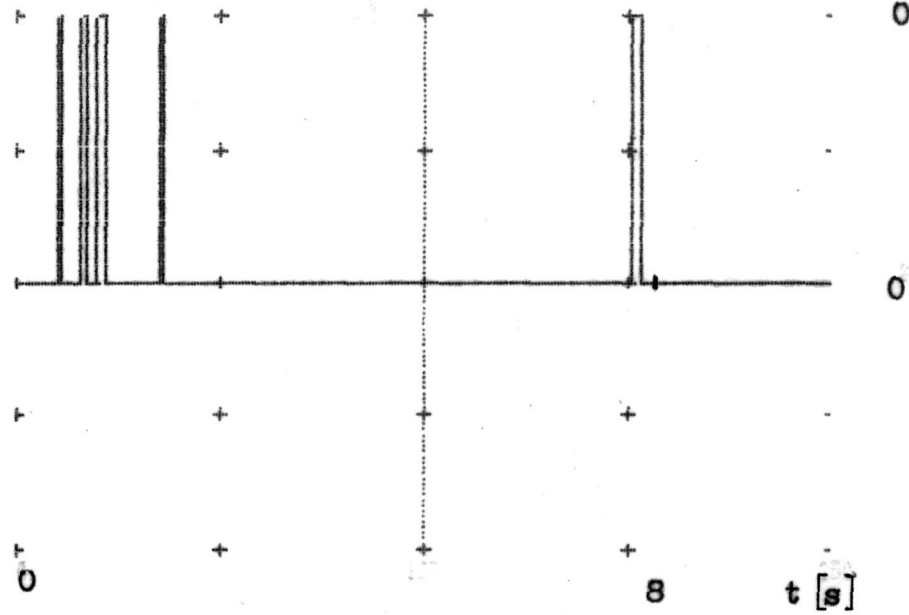




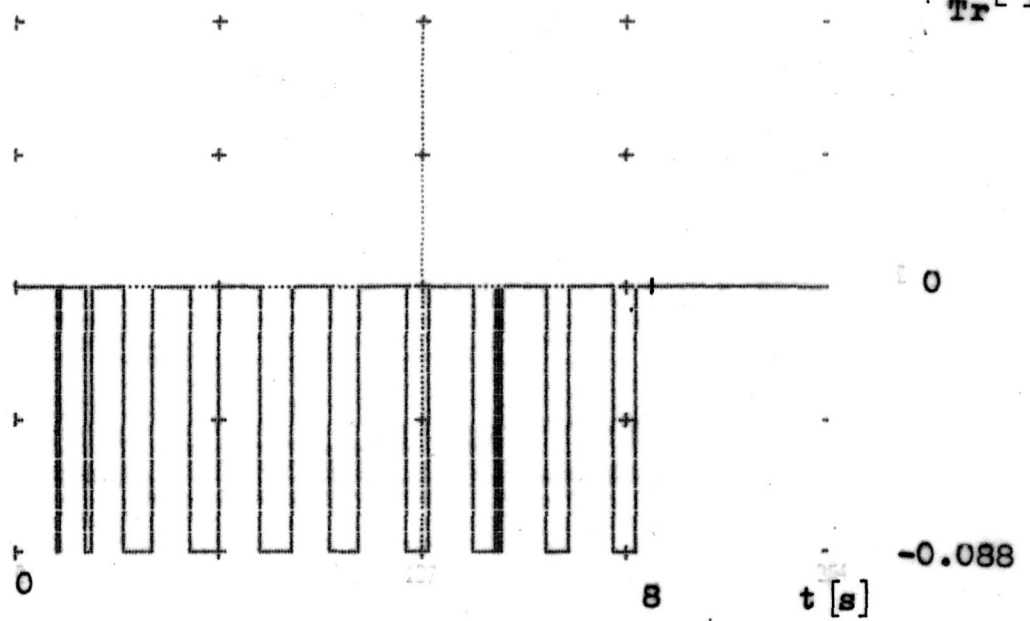


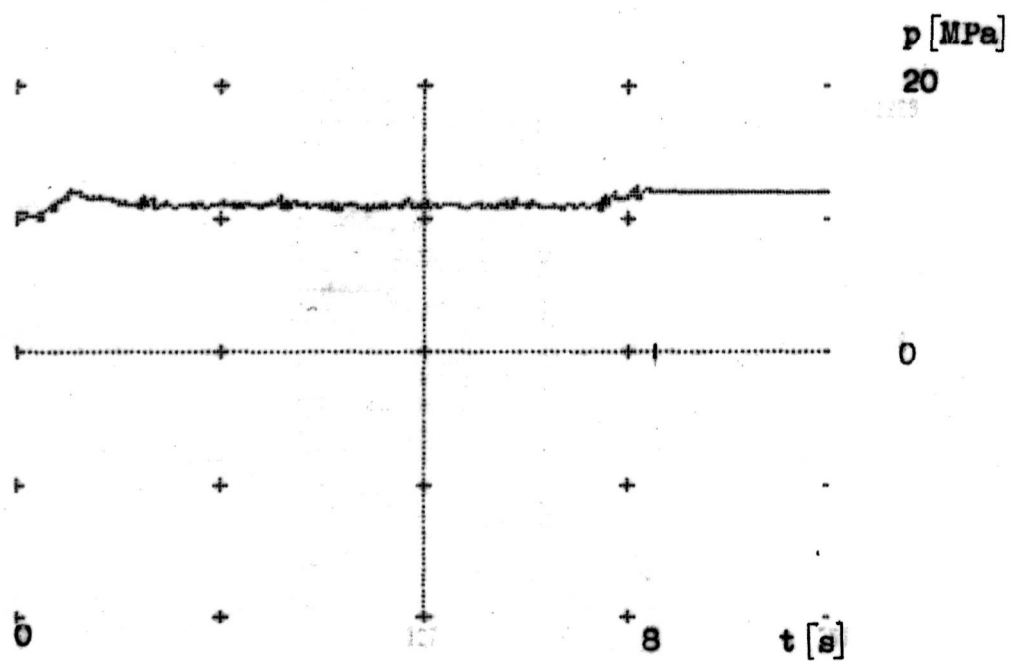
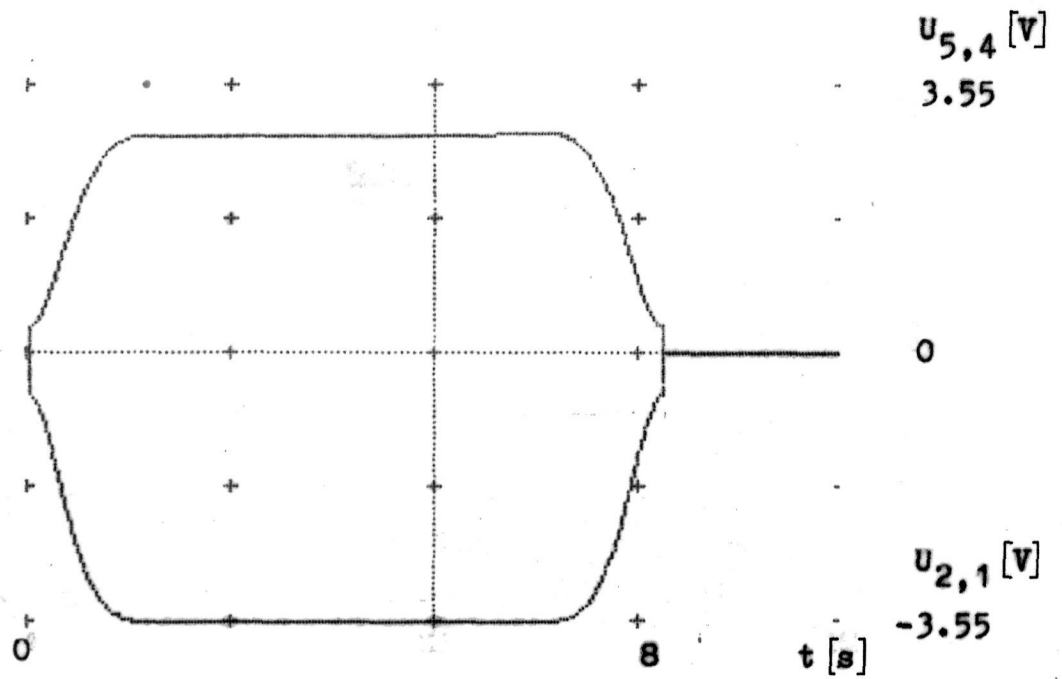


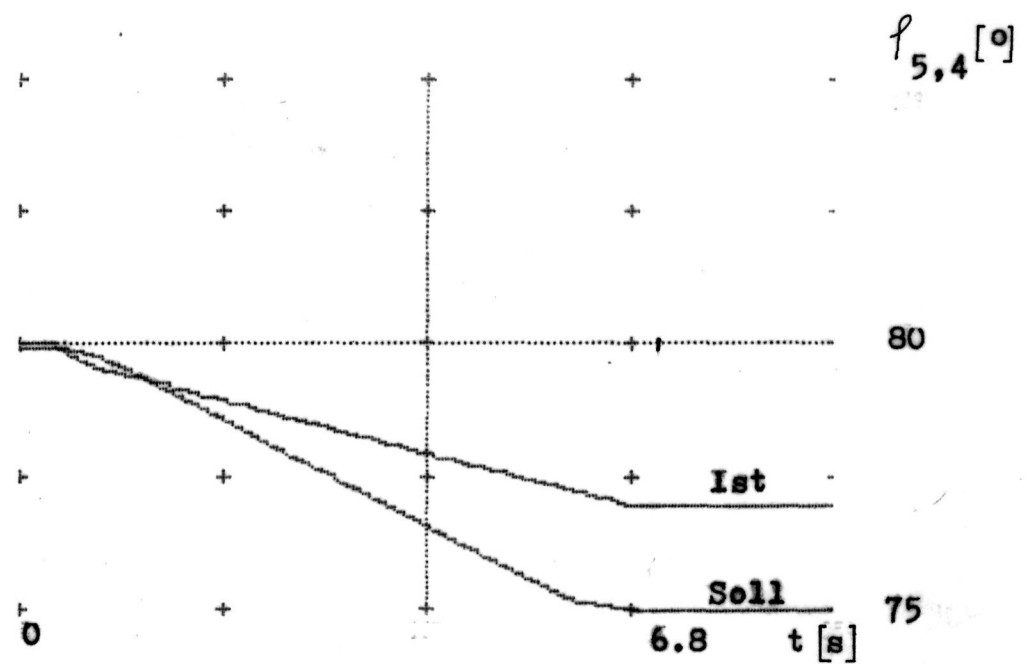
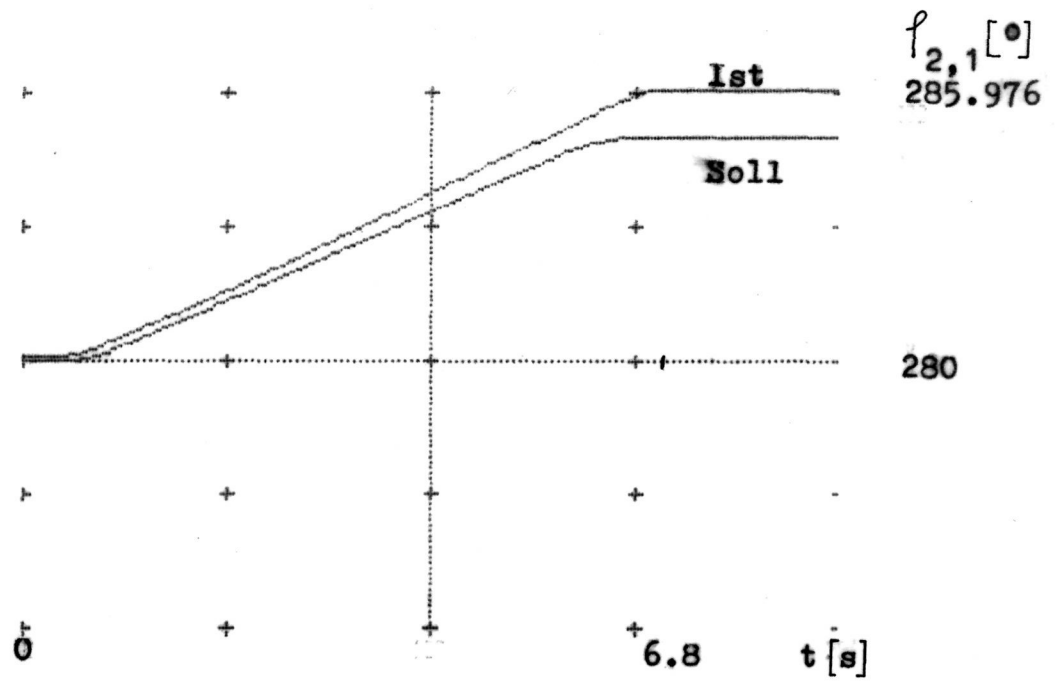
$f_{Sl} [^\circ]$
0.088

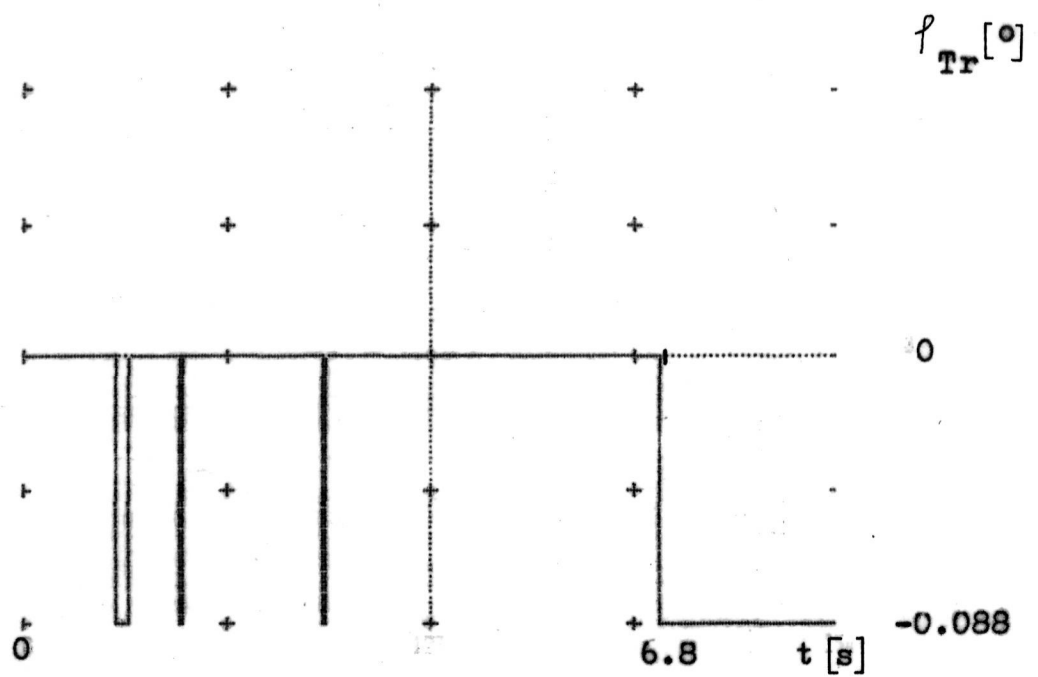
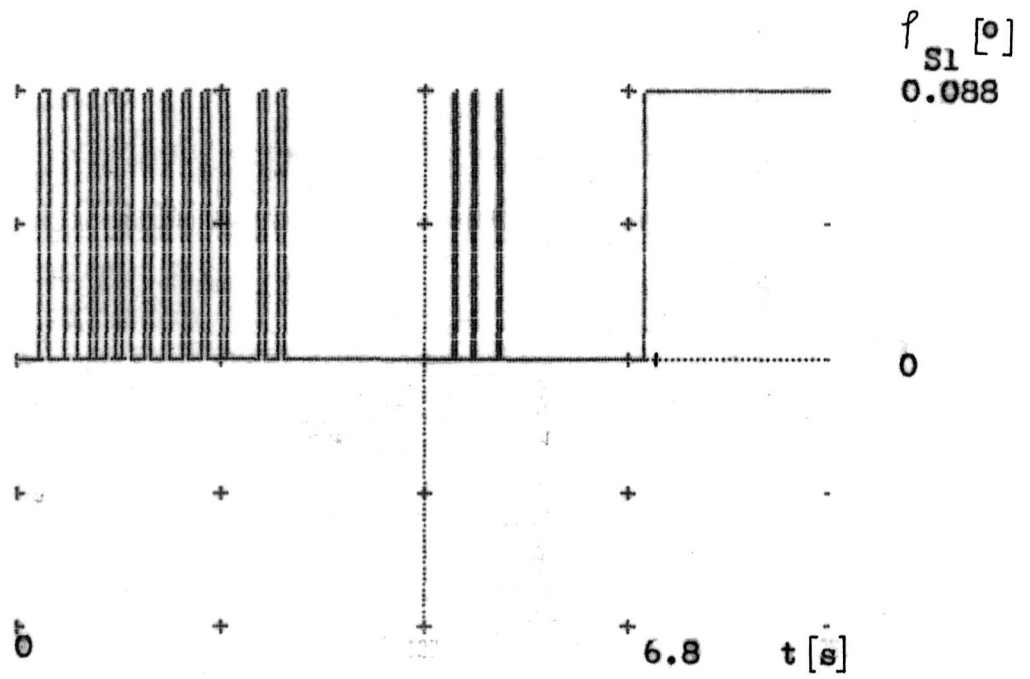


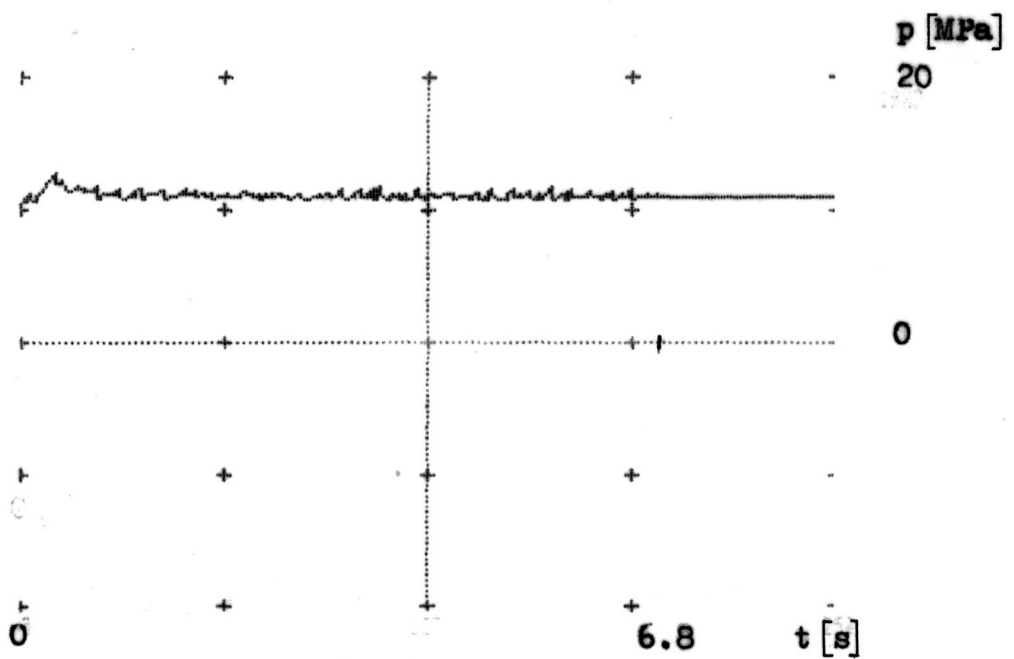
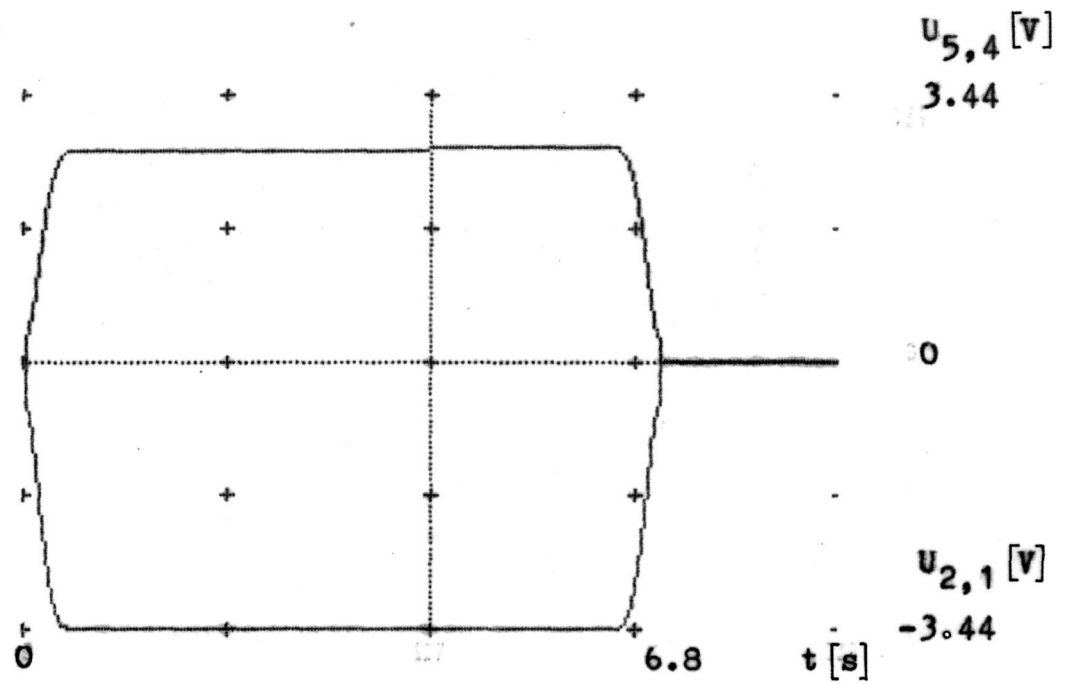
$f_{Tr} [^\circ]$

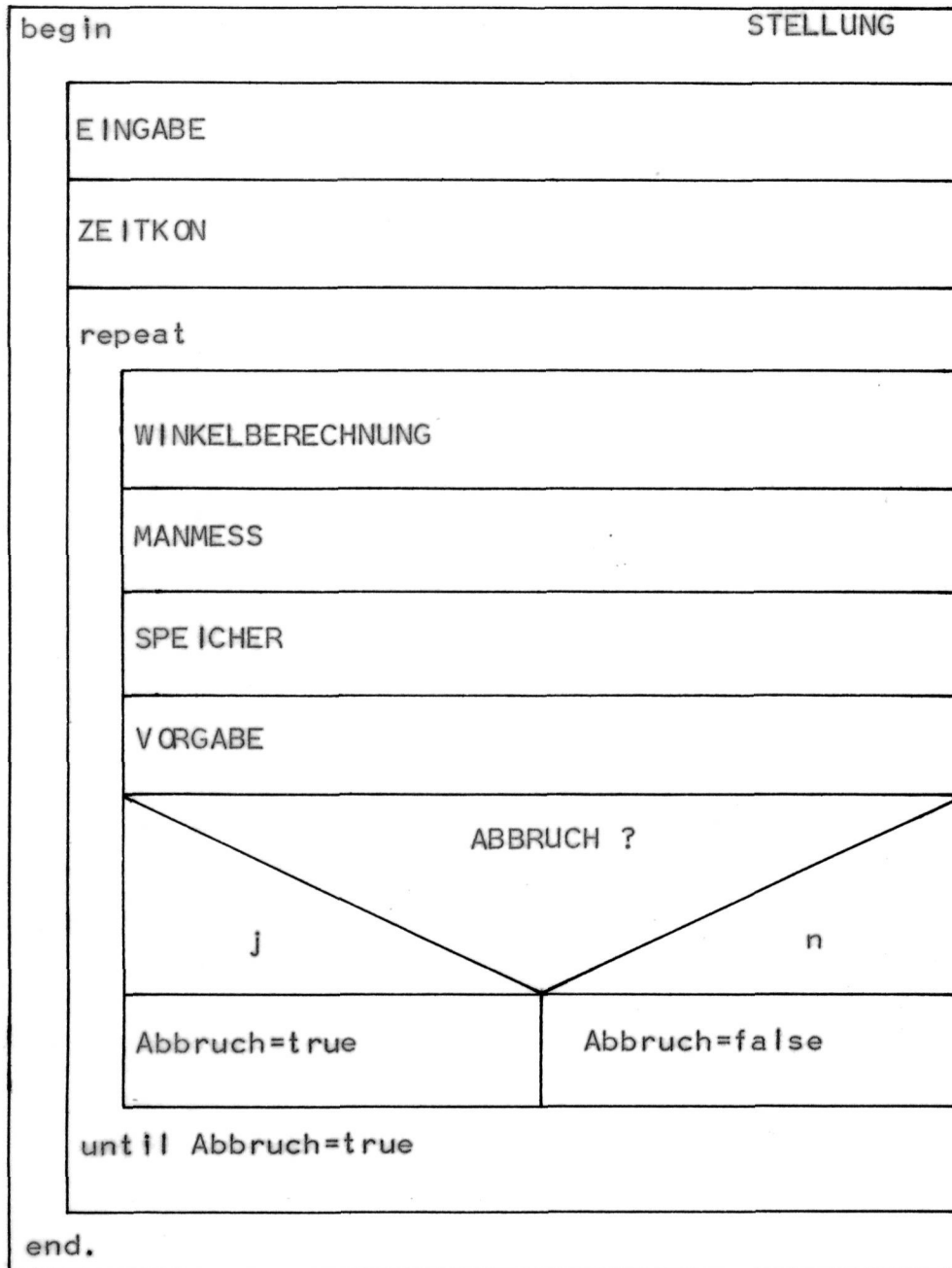


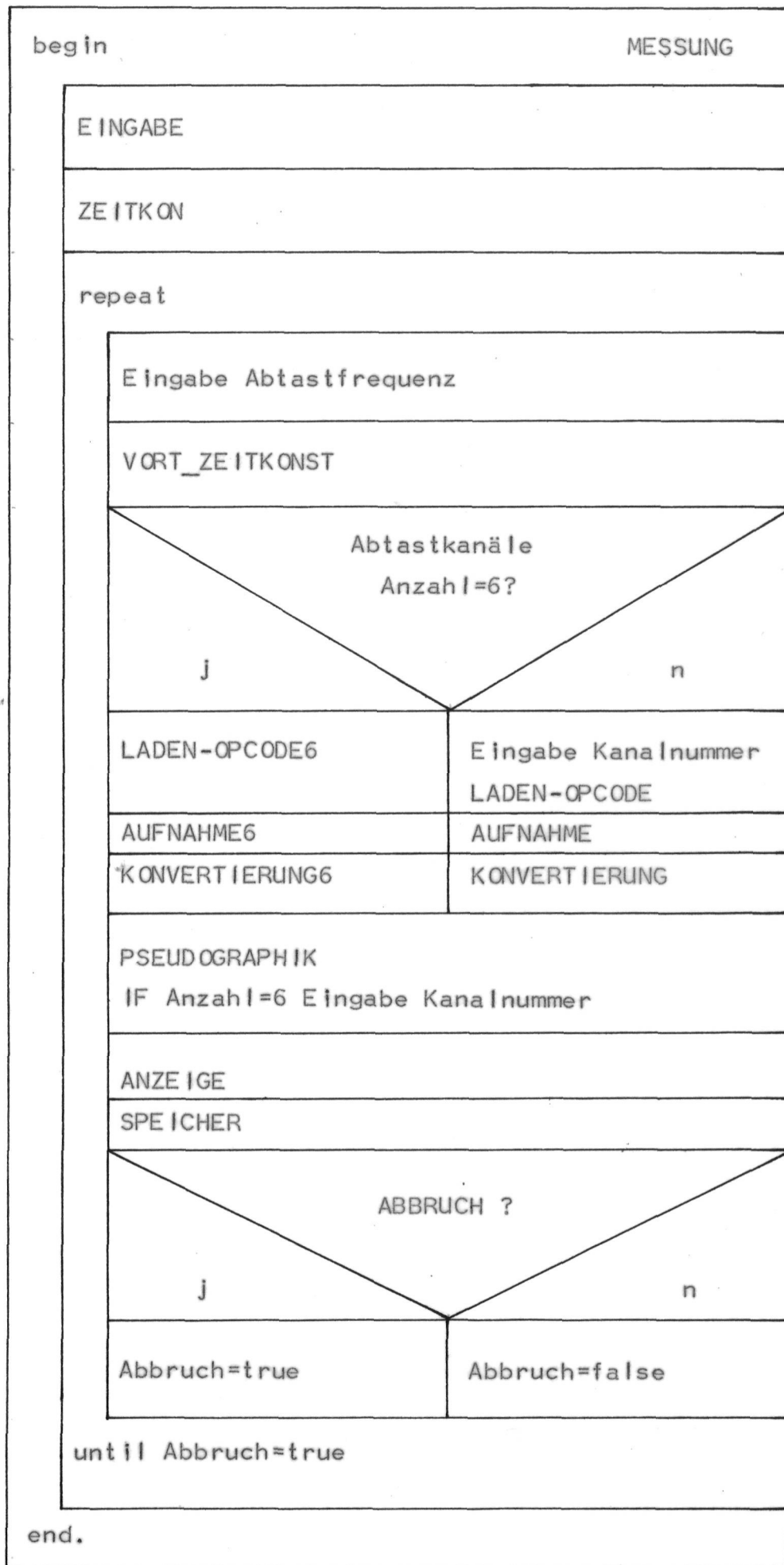


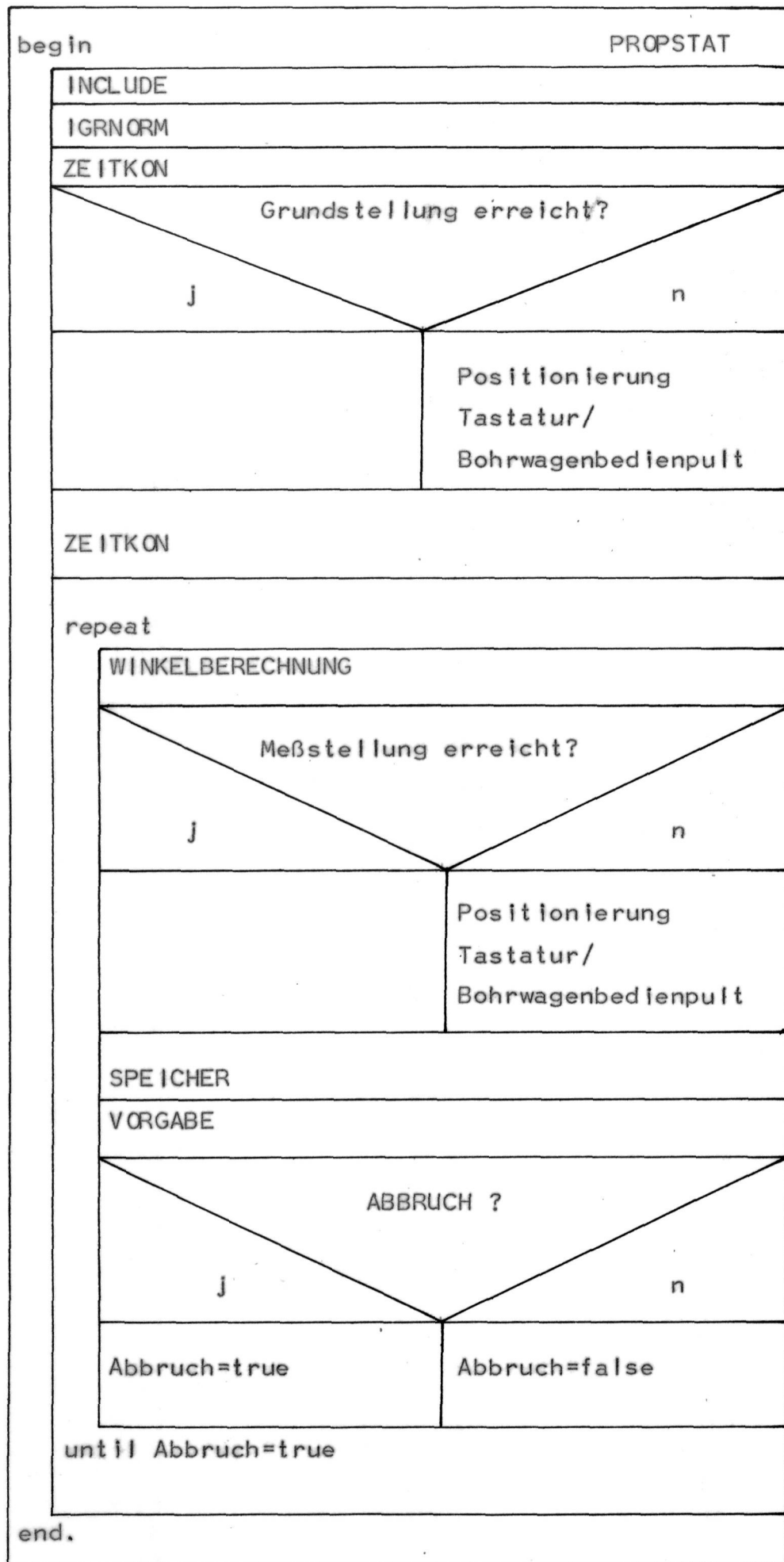


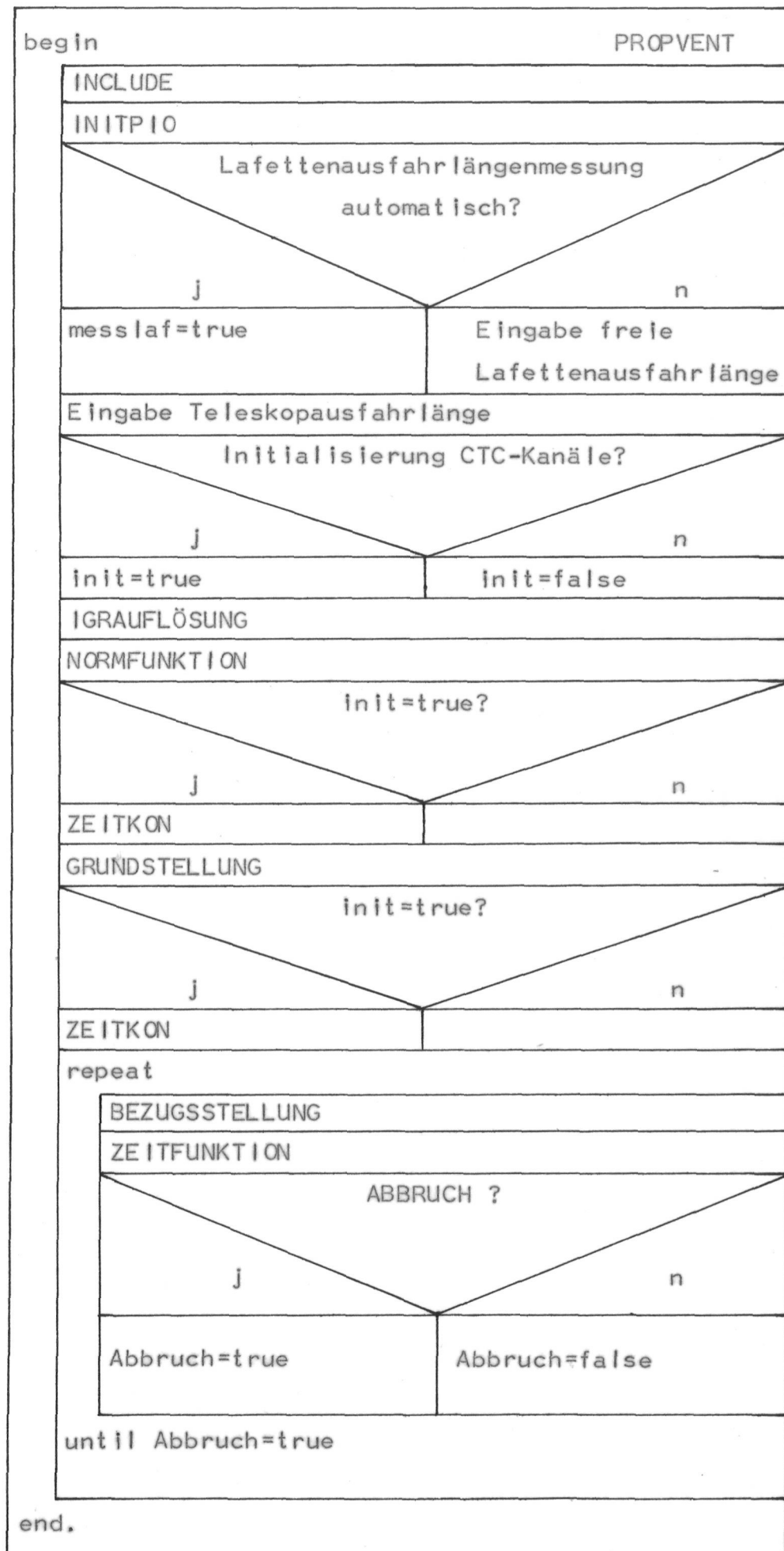












Anlage 6

Name	Textgröße kByte	COM-Filegröße kByte

ANALOG	2	9
ANDRU	4	12
ANDRUNEU	4	10
AUSWERT	18	11
BOHRWA	12	23
DATMAN	2	10
HAND	6	10
MATMUL	6	12
MESSUNG	14	18*
MOD IF	6	12
MOD IFNEU	4	11
MULT I	8	16
MULT I NEU	8	16
PROPSTAT	5	35
.EINGABE	2	-
.HANDLANG	6	-
.HANDSCHN	16	-
.IGRNORM	4	-
.KORREKT	1	-
.POSITION	4	-
.TEXT	4	-
.VORABBR	4	-
.WINKSPE I	2	-
.ZAEHLTAS	3	-
PROPVENT	3	54*
.BEDIENP	2	-
.BEZUGSST	3	-
.DISKDIR	2	-
.EINGABE	1	-
.GRAFIK	3	-
.GRUNDST	2	-
.HANDLANG	7	-
.HANDSCHN	18	-
.IGRAUFL	2	-

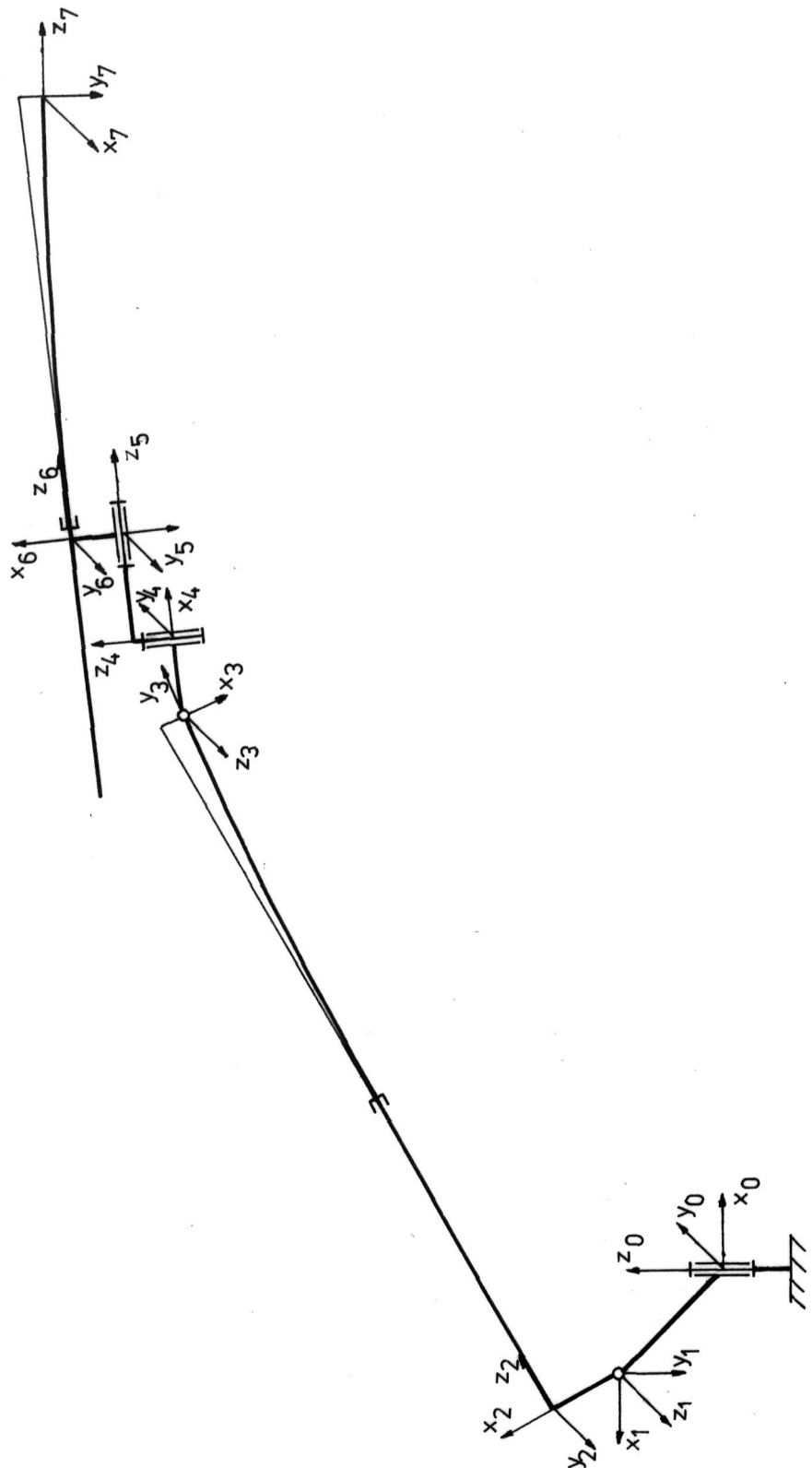
Anlage 6

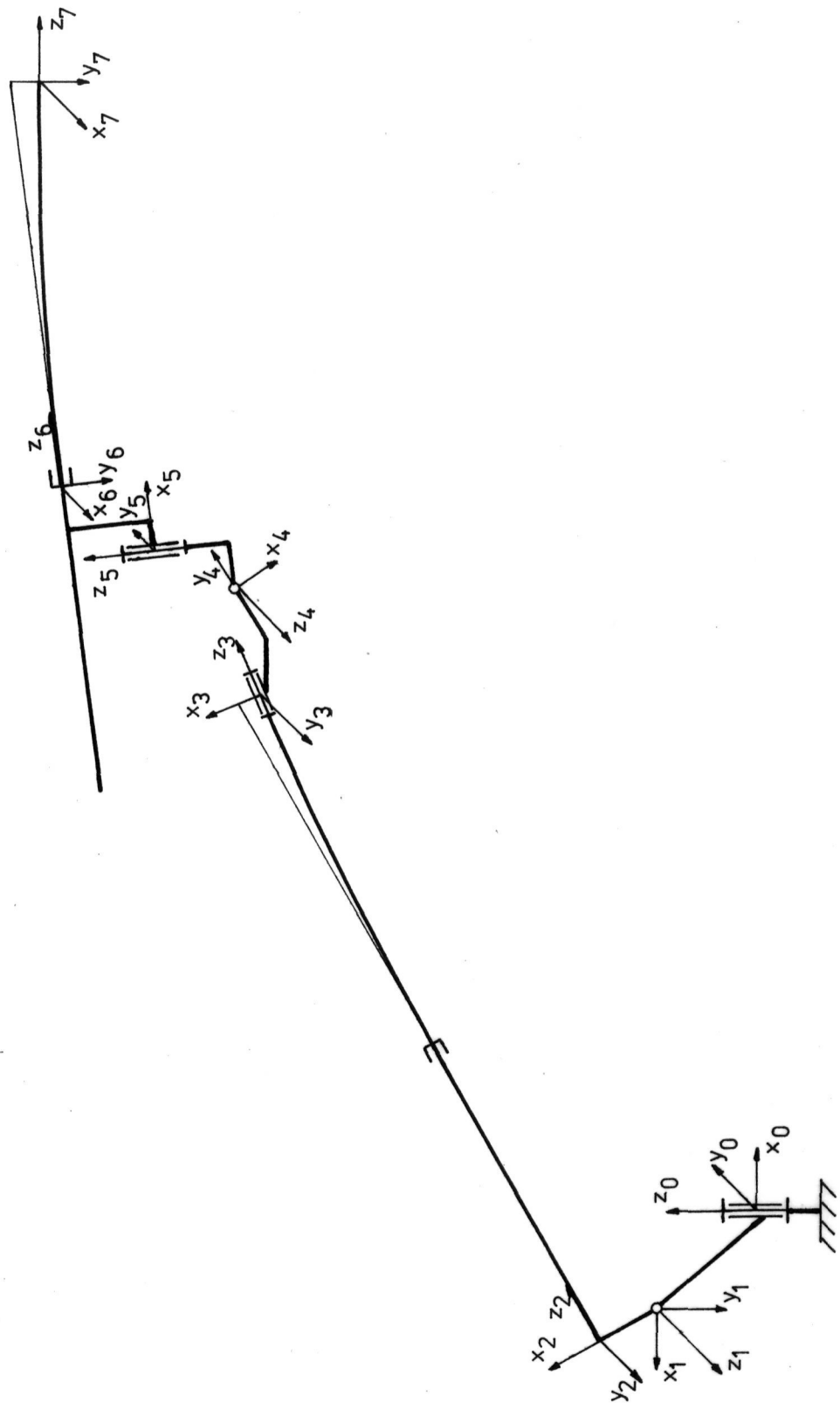
Name	Textgröße kByte	COM-Filegröße kByte
<hr/>		
.INITPIO	1	-
.KONVERT	2	-
.NORMFUNK	4	-
.OPCODE	6	-
.POSITION	4	-
.TEXT	4	-
.VEREINB	3	-
.WINKSPEI	2	-
.ZAEHLTAS	2	-
.ZEITFUNK	3	-
POSIT	4	10*
REGEL54	10	12*
REGEL541	10	12*
REGPOS	14	18*
SB 2/2	13	14
SPRUNG	1	8
STELLUNG	16	20
UMKOP	4	10
VEROEL	8	27
VERT12	6	27
.DECL2	3	-
.DREIECK	2	-
.INPUT	2	-
.RECHTECK	2	-
.ROBOTER	5	-
.SINOIDE	2	-
.SINUS	2	-
VERWINK	6	27

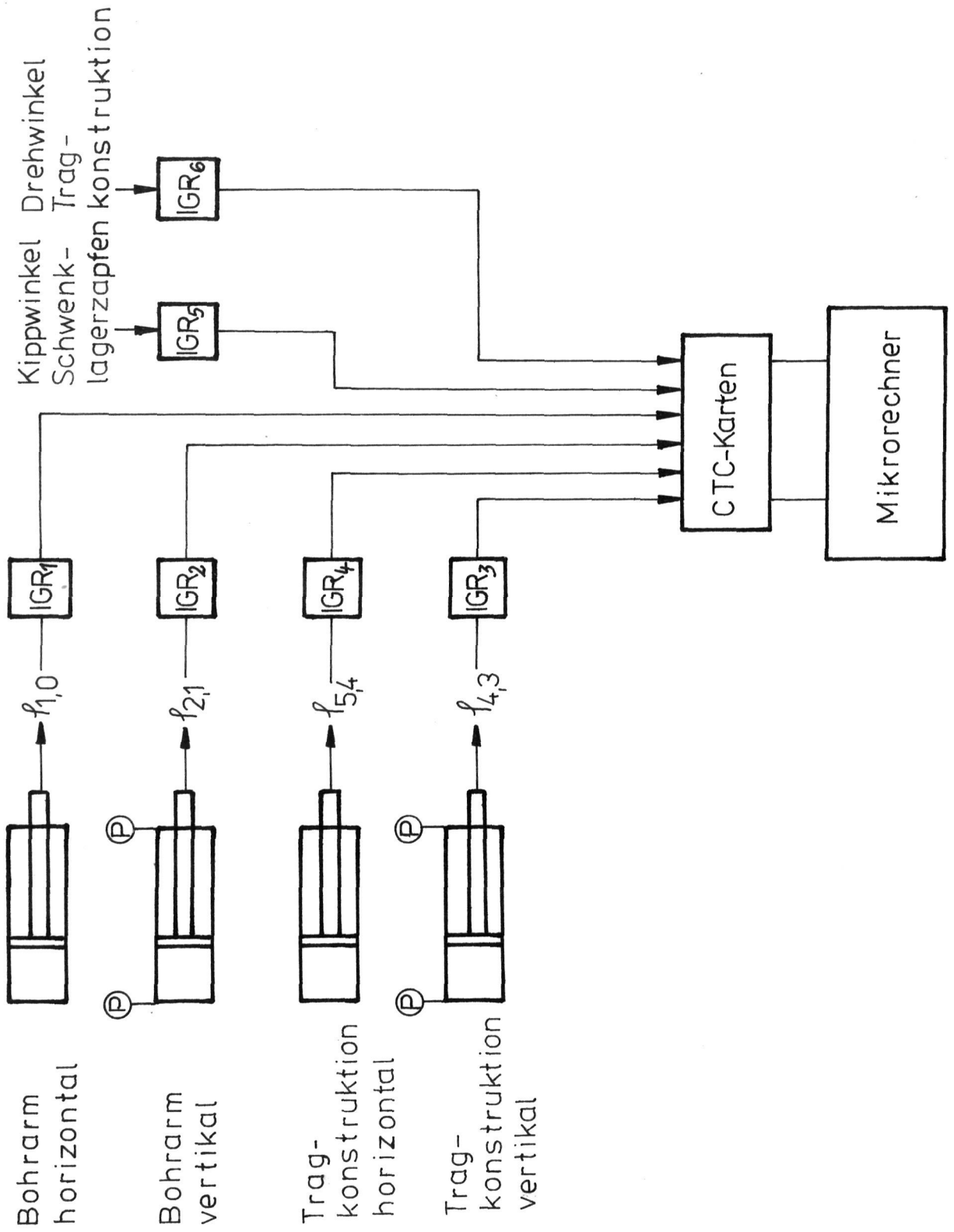
* - einschließlich der Assemblerteile

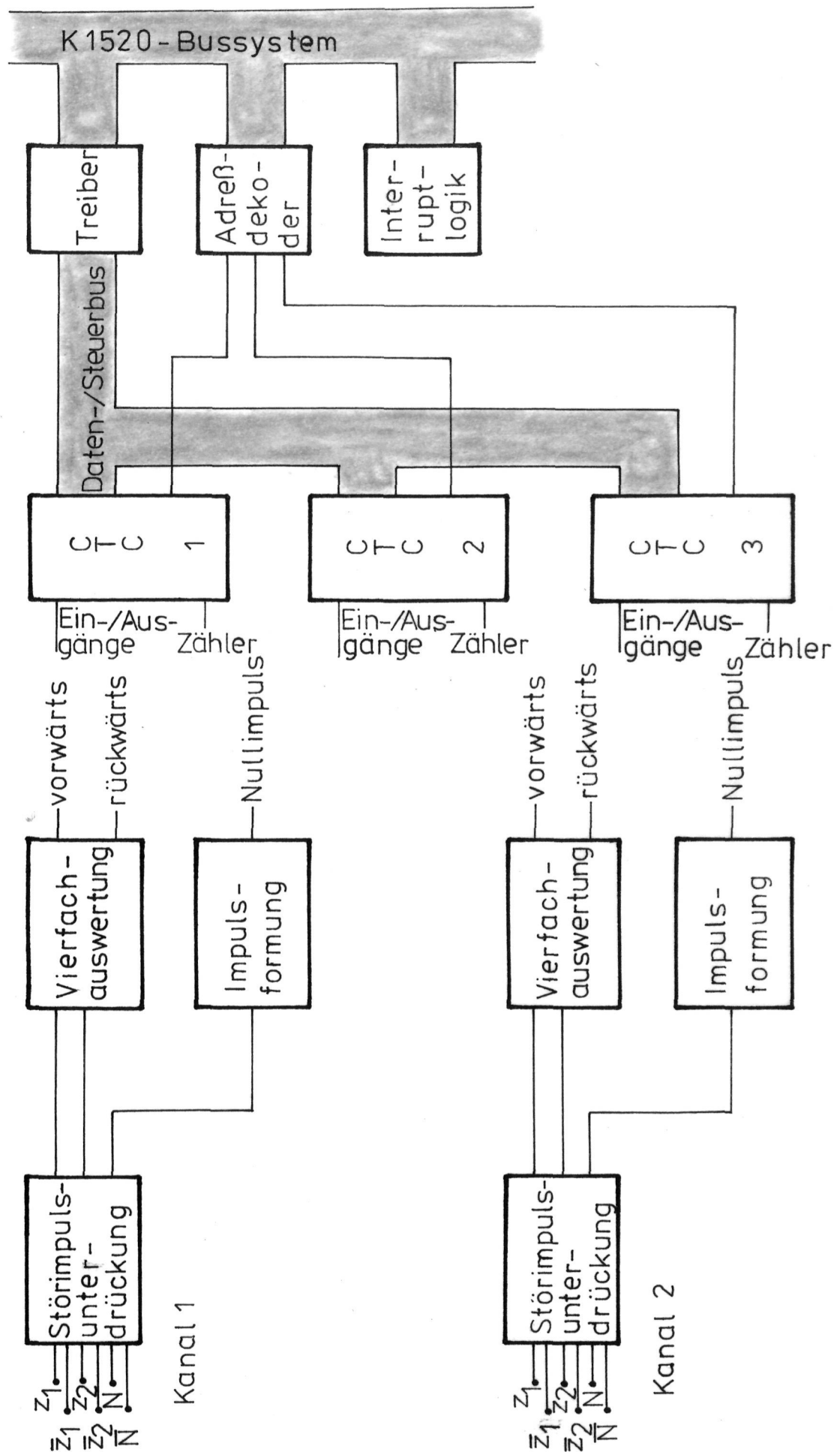
.name - INCLUDE - File

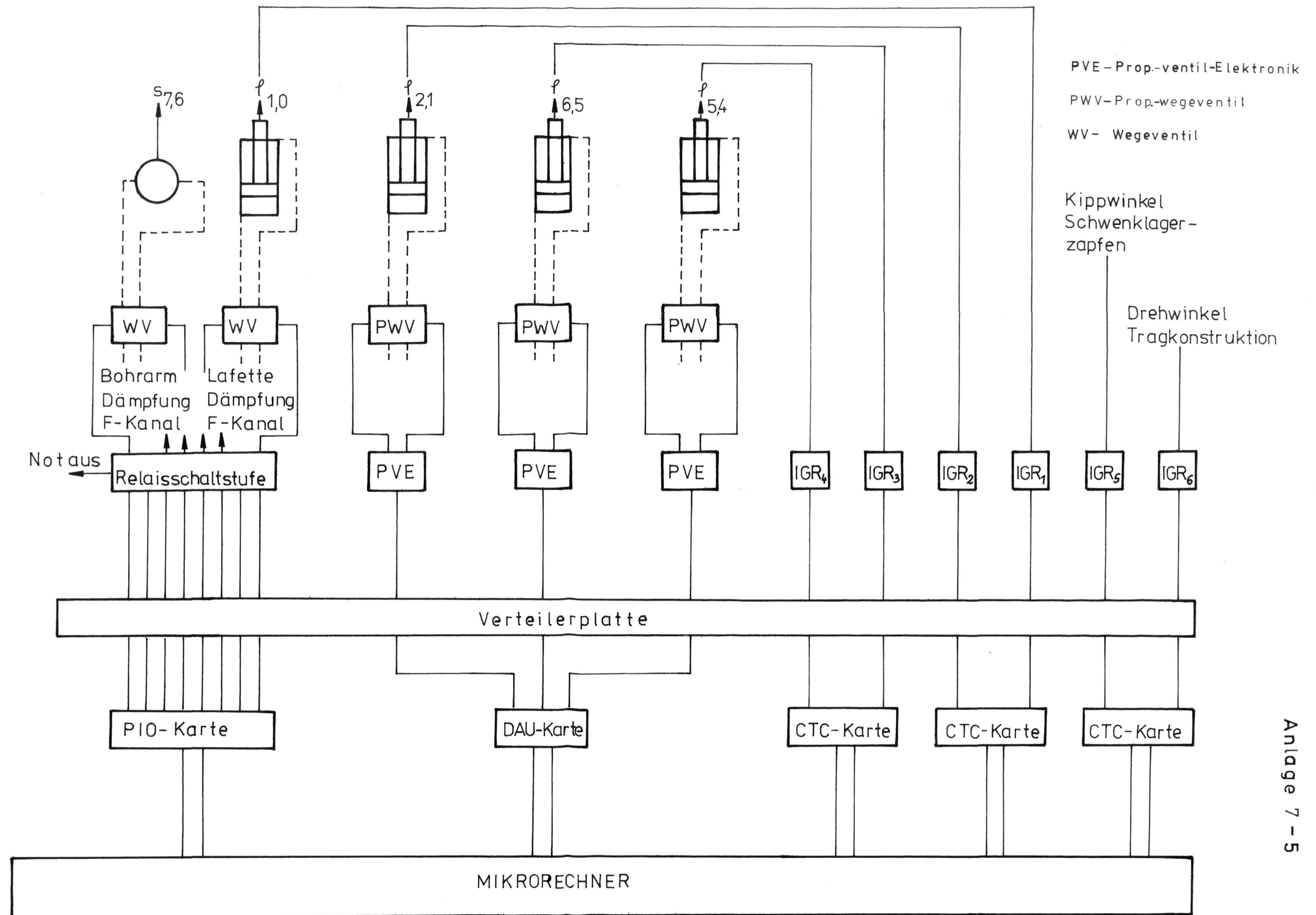
Anlage 7-1

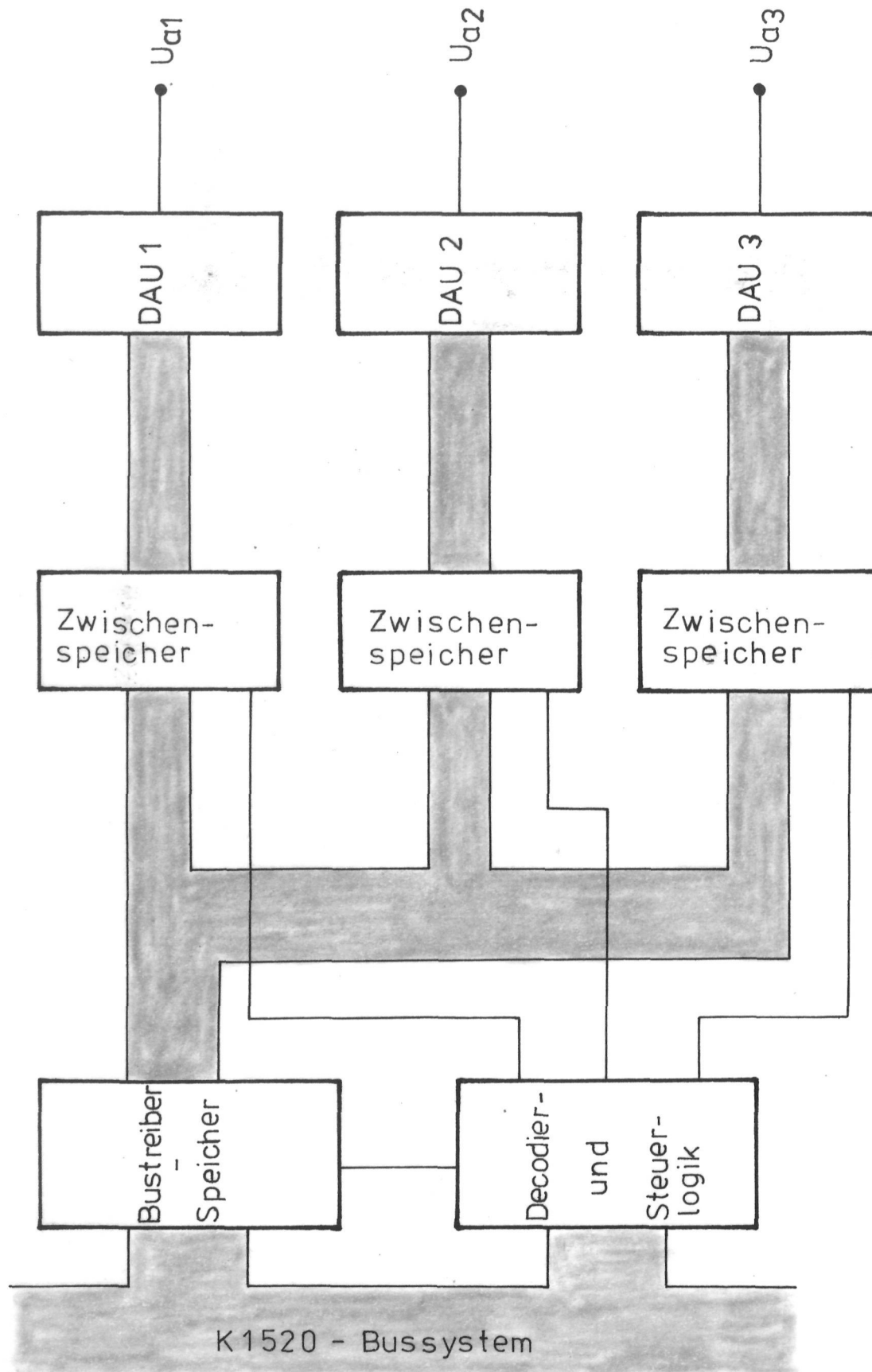


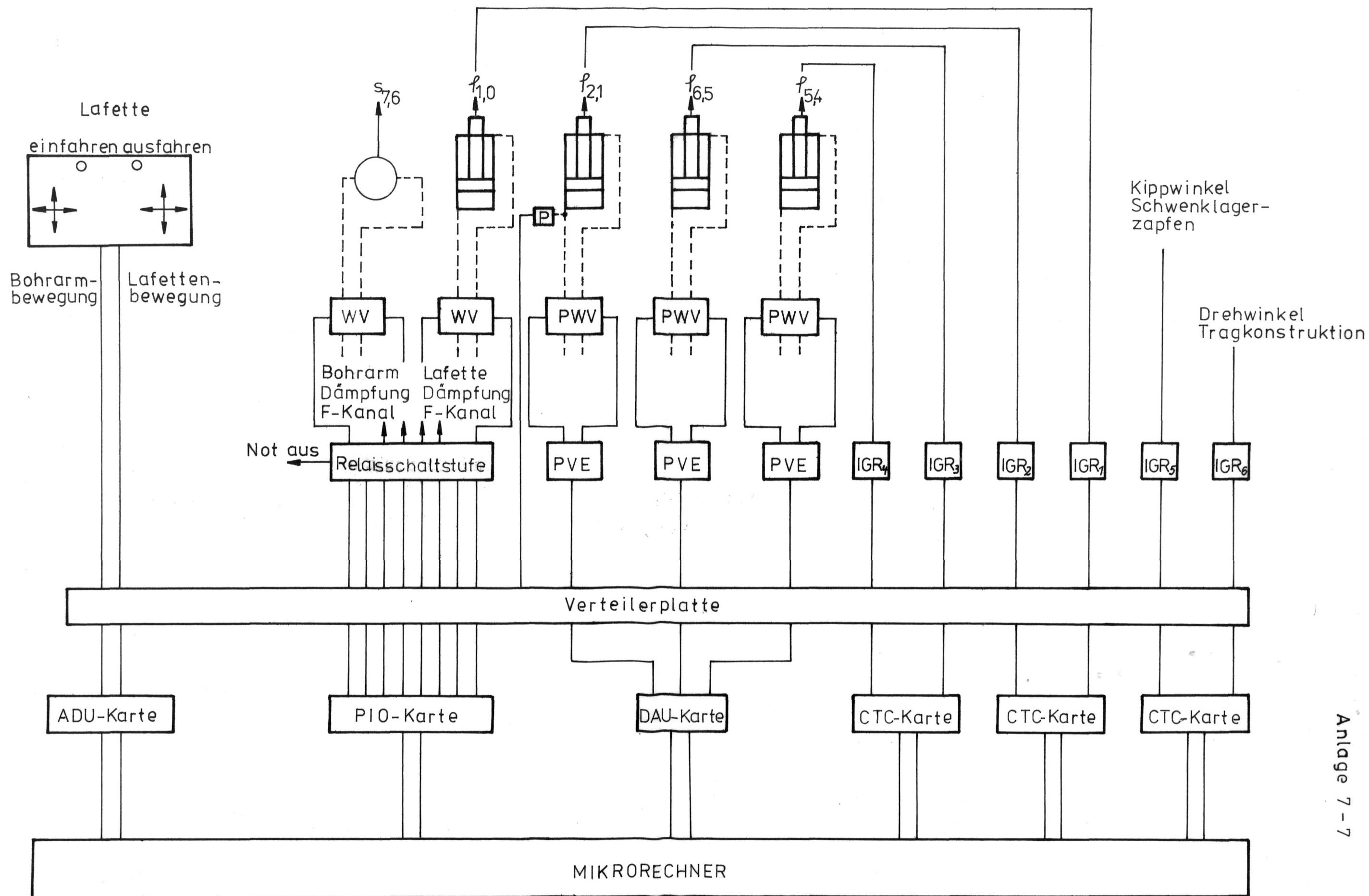


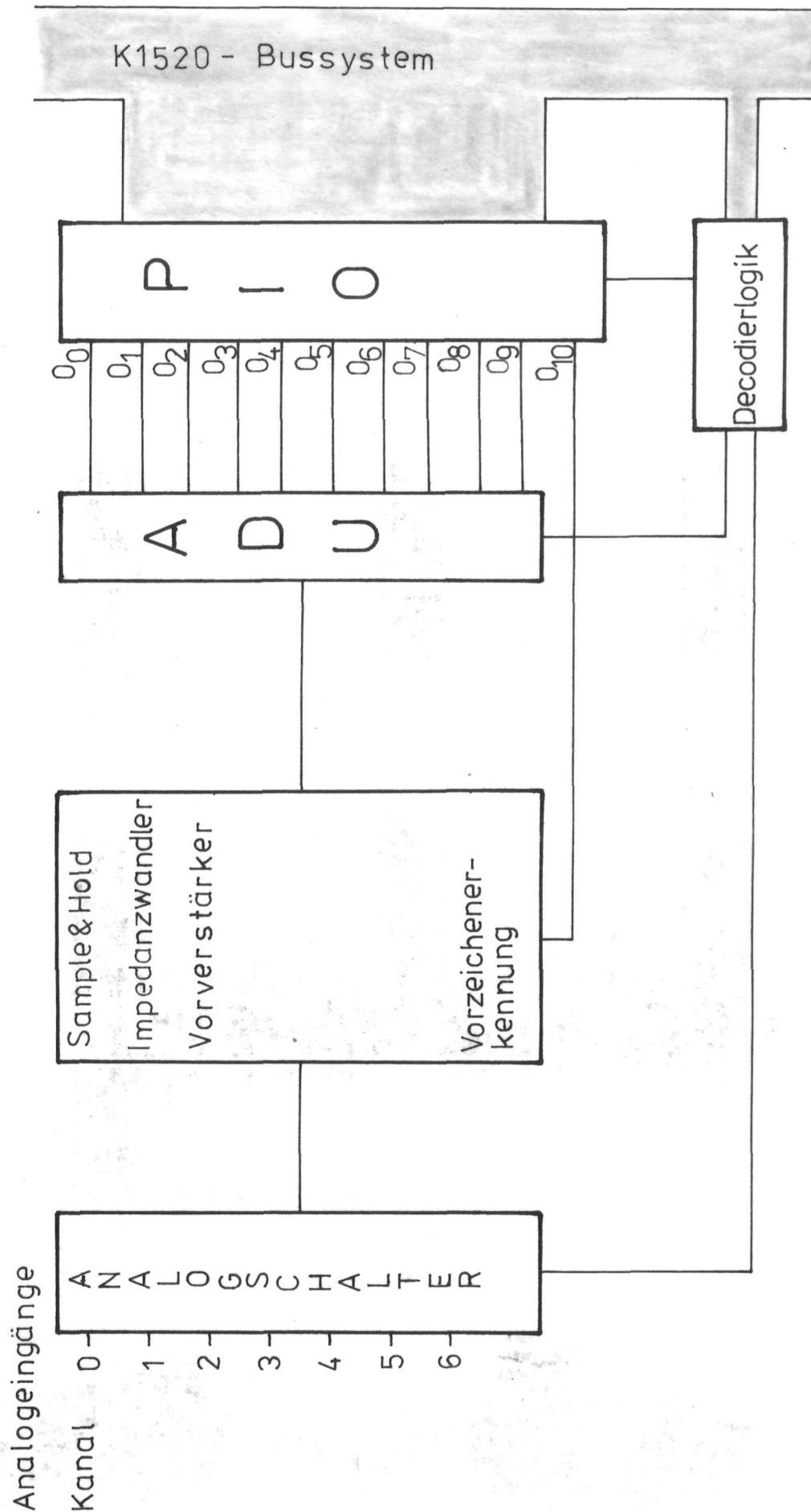


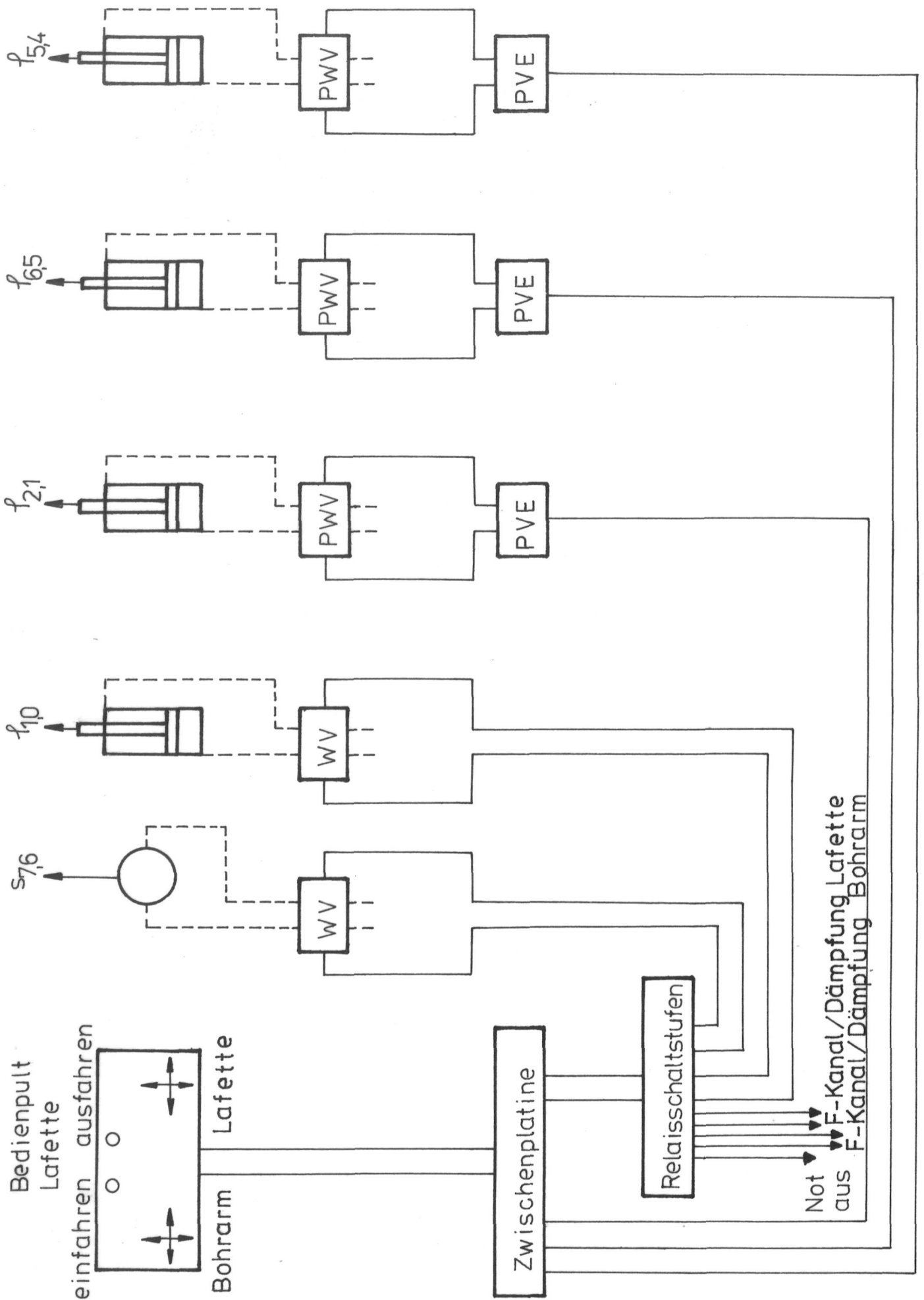






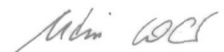






Ich erkläre, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig und
nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel
angefertigt habe.

Ilmenau, den 10.04.1988



Martin Walter

Untersuchungen zur Modellierung und zur Automatisierung von
Sprenglochbohrwagen unter Berücksichtigung der Parallelführung
der Lafette

Thesen zur Dissertation
von Dipl.- Ing. Martin Walter

eingereicht am 11.04.1988 bei der Fakultät
für Technische Wissenschaften
des Wissenschaftlichen Rates der Technischen Hochschule
I l m e n a u
zur Erlangung des akademischen Grades Dr.- Ing.

1. Kalisalze sind ein bedeutender Rohstoff für die Volkswirtschaft und darüberhinaus ein wichtiges Exportgut.

Ihr Abbau erfolgt in der DDR vorrangig unter Nutzung der Sprengtechnologie. Dabei werden die Bohrlöcher für die Aufnahme des Sprengstoffes mit sogenannten Sprenglochbohrwagen eingebracht. Eine Erhöhung des Abschlagwirkungsgrades erfordert eine Verbesserung der Qualität dieser Löcher in Bezug auf Position und Richtung. Insbesondere ist die Parallelität der Bohrlöcher zu einer Bezugsrichtung von großer Bedeutung.

2. Für die Automatisierung der Positionierung ist zur definierten Ansteuerung aller Antriebe ist die Formulierung der Parallelitätsbedingung erforderlich, die die Berechnung der einzelnen Antriebsführungsfunktionen erlaubt.

3. Zur Realisierung der Lafettenparallelführung sind mehrere Verfahren bekannt. So gibt es mechanische und die hydraulische Parallelführungen, die auf einem Winkelvergleich korrespondierender Antriebe einer Bewegungsebene beruhen.

Bei der mechanischen Parallelführung werden Gestänge zwischen Bohrwagenchassis und Lafette angeordnet. Damit entstehen Parallelogramme, die bei Bewegung des Bohrarmes die Lafette automatisch nachführen.

Bei der hydraulischen Parallelführung erfolgt die Übertragung der Bohrarmbewegung auf die Lafette durch zusätzliche Zylinder, die direkt mit den jeweiligen Lafettenantrieben verbunden sind. Bisherige Ausführungen von elektrohydraulischen Parallelführungen benützen ebenso den Winkelvergleich. Dazu werden elektrische Sensoren zur Winkelerfassung angebracht und über analoge Differenzverstärker ausgewertet, deren Ausgangssignale zur Ansteuerung der Hydraulikantriebe verwendet werden.

In der Arbeit wird nachgewiesen, daß ein Winkelvergleich als einziges Kriterium der Parallelität hohe Anforderungen an die Richtungsgenauigkeit nicht erfüllen kann, sodaß weitere Kriterien ermittelt und berücksichtigt werden

müssen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die sich aus der Parallelitätsbedingung ergebenden Beziehungen zwischen den Gelenkkoordinaten Funktionen der Lafettenposition und somit bei der Abarbeitung eines Bohrschemas nicht konstant sind. Deshalb ist eine Vorausberechnung der Gelenkstellungen eines Bohrschemas nur bei bekannter Relativlage von Bohrwagen und Bohrebene möglich.

4. Zur Beschreibung und Untersuchung des Positionierungsverhaltens werden Modelle für die Koordinatentransformation, die Kraft- und Momentberechnung, die gesteuerte und die geregelte Parallelführung geschaffen. Die Beurteilung der Modelle erfolgt durch Vergleich von modellierten und gemessenen Werten.

5. Zur Modellierung des Positionierverhaltens wird in jedem Gelenk ein Koordinatensystem nach der Hartenberg- Denavit-Methode eingeführt. Mit dieser Methode wird durch Zwangsbedingungen die Anzahl der Parameter von 6 auf 4 reduziert. Dabei sind ein Winkel und eine Länge als Gelenkvariable für Dreh- bzw. Schubgelenke festgelegt. Über Transformationsmatrizen werden die Beziehungen zwischen Gelenkvariable und Koordinatensystemposition beschrieben.

Aus dem Vergleich von berechneten und gemessenen Positionen angebrachter Meßpunkte ist die Biegung von Bohrmarm und Lafette als dominierender Einfluß auf die Position nachweisbar. Bei der Modellierung ist damit die Verwendung starrer Transformationsbeziehungen nicht möglich.

Die unter Berücksichtigung von Bohrmarm- und Lafettendurchbiegung erreichte Genauigkeit der berechneten gegenüber der gemessenen Position der Lafettenspitze in einem Bezugskoordinatensystem beträgt bezogen auf den Abstand zwischen Lafettenspitze und Koordinatenursprung 98 %. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit ist die Berücksichtigung weiterer Einflüsse wie Torsion, Spiel notwendig.

6. Das Modell der gesteuerten Parallelführung berechnet die Ansteuerfunktionen der Vertikalantriebe von Bohrarm und Lafette für einen Positioniervorgang. Aus den eingegebenen Start- und Zielpositionen werden mit dem gewählten Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsprofil der vorgesehenen Bewegung des Bohrarmvertikalantriebes entsprechend der eingegebenen Stützstellenanzahl die für jeden Abtastzeitpunkt einzustellenden Gelenkwinkel berechnet. Daraus wird über die Parallelitätsbedingung, die die Biegung von Bohrarm und Lafette berücksichtigt, die Geschwindigkeitsfunktion des Lafettenantriebes ermittelt. Über eine Kennlinienapproximation der Steuerspannungs- Ölstrom- Kennlinie der Hydraulikantriebe werden aus den Geschwindigkeitsverläufen die Steuerspannungsfunktionen der Proportionalstromregelventile berechnet.

In Auswertung der bei unterschiedlichen Beschleunigungsfunktionen ermittelten Meßwerte zeigt sich, daß die o. g. Approximationsfunktion besonders bei geringen Ventilaussteuerungen so ungenau ist, daß größere Abweichungen im zeitlichen Verlauf der Bewegung und in der Endposition gegenüber den berechneten Werten auftreten. Der Fehler in der Endposition beträgt für den Bohrarmantrieb maximal 14 % und für den Lafettenantrieb 70 %. Bei der Durchführung weitergehender Untersuchungen ist eine Verbesserung des Hydraulikmodells notwendig.

7. Für die geregelte Parallelführung stehen Modelle für Hand- und Automatikbetrieb zur Verfügung.

Bei Handbetrieb erfolgt die Ansteuerung des Bohrarmvertikalantriebes über einen Handsteuerhebel und der Lafettenvertikalantrieb wird geregelt nachgeführt, wobei als Regelkriterium die aus der Parallelitätsbedingung ermittelten Beziehungen zwischen den Gelenkkoordinaten darstellt.

Im Automatikbetrieb werden ausgehend von einer erfaßten Istposition der Gelenke (Bezugsstellung) aus der Zielposition des Bohrarmvertikalantriebes und einem festen Geschwindigkeitsprofil die einzelnen Stützstellen für jeden

Abtastzeitpunkt berechnet. Der Bohrarmantrieb wird nach diesen berechneten Sollpositionen geregelt, wogegen der Lafettenantrieb nach dem Bohrarmantrieb geregelt wird.

Mit den Meßwerten der erreichten Endpositionen der Gelenkkoordinaten ist eine maximale Richtungsabweichung gegenüber der modellierten Parallelitätsbedingung von 0.23° ermittelt worden.

Aus der Beurteilung der Bewegung läßt sich der Einfluß der Reglerparameter auf das Positionierungsverhalten erkennen. Verstärkungen von etwa 50 für die Bohrarm- und 20 für die Lafettenregelung wurden bei Verwendung eines P-Algorithmus als günstig für ein schwingungsarmes Verhalten ermittelt. Da auf Grund der unterschiedlichen Kolbenflächen der Hydraulikzylinder bei Auf- und Abwärtsbewegungen bei gleichem Ölstrom verschiedene Geschwindigkeiten erreicht werden, sind die Reglerparameter für jeden Antrieb entsprechend der Bewegung zu verändern.

8. Zur Durchführung der Messungen wurde ein mikrorechnergesteuertes Steuer- und Meßsystem geschaffen. Es realisiert mit entsprechenden Interfacebausteinen die Sensordatenerfassung, die Bedienpultabfrage und die Hydraulikantriebsansteuerung. Während der Messung erfolgt eine automatische Meßwerterfassung und -anzeige sowie Abspeicherung der Meßdaten auf Diskette und die Ausgabe der Steuerspannungen an die Proportionalventilelektronik.
9. Aus Modellierung und Messung lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:
 - Zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens der Lafette bei der Positionierung ist der Einsatz der Proportionalventiltechnik unbedingt erforderlich. Die Hydraulikkreisgestaltung muß die gleichzeitige Betätigung mehrerer Antriebe ermöglichen.

- Zur Verringerung des Einflusses von Biegung, Spiel und Torsion auf die Positionierung sind konstruktive Veränderungen besonders im Bereich des Kreuzgelenkes vorzunehmen.
- Eine Positionierung der Lafette mit der erforderlichen Genauigkeit ist durch eine reine Steuerung nicht zu erreichen, da eine modellmäßige Erfassung aller (auch zufälliger) Einflüsse zur Vorausberechnung der Bewegung nicht möglich ist. Der Einsatz von Regelungen ist daher notwendig.
- Zur Realisierung der geregelten Lafettenparallelführung ist die Durchsetzung eines Bordrechnerkonzeptes erforderlich, wobei die Verwendung eines einzigen CPU- Schaltkreises U 880 als Steuerrechner wahrscheinlich nicht ausreichend ist. Um die Geschwindigkeitsanforderungen zu erfüllen, ist der Aufbau eines Mehrrechnersystems mit Steuer- und Achsrechner notwendig.

10. Unter Berücksichtigung bergbautechnischer Bedingungen wird entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse die folgende Realisierungsvariante vorgeschlagen, deren Blockschaltbild Abbildung 1 zeigt.

Die Regelung der Einzelantriebe wird ausschließlich von Achsrechnern vorgenommen, für die der Steuerrechner die Sollwerte vorgibt. Dazu müssen die Sensoren sowohl von den Achsrechnern als auch vom Steuerrechner auslesbar sein. Zur Durchführung der Koordinatentransformation, die zu Positionsbestimmung und Sollwertberechnung für die Regler notwendig ist, kann ggf. zur Entlastung des Steuerrechners ein Arithmetikprozessor vorgesehen werden.

Die Ansteuerung des Bedienpultes sowie die Anzeige von Betriebsdaten für den Bediener werden ebenfalls vom Steuerrechner realisiert.

Zur Abfrage von Sicherheitseinrichtungen, die von einem weiteren Achsrechner bzw. vom Steuerrechner übernommen wird, ist zusätzlich der Einsatz von Hardwarebaugruppen als Schutz bei Systemabsturz vorzusehen.

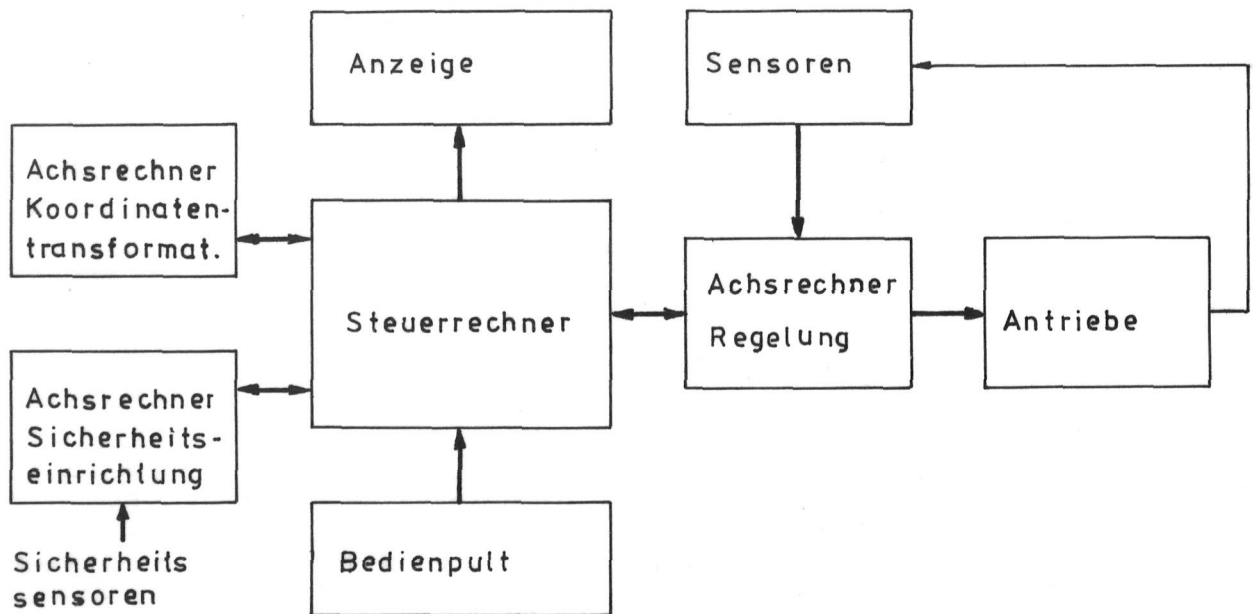


Abbildung 1: Blockschaltbild der Realisierungsvariante

Die Variante besitzt folgende Betriebsarten:

- Handsteuerung
- Handpositionierung mit geregelter Parallelführung
- automatische Positionierung mit geregelter Parallelführung (Automatikbetrieb)

Für die Einstellung der Bezugsstellung ist der Handbetrieb notwendig. Darüberhinaus ermöglicht er die Lafettenpositionierung bei den Randlöchern des Bohrschemas.

Die Handpositionierung mit geregelter Parallelführung dient dem schnellen Anfahren von Bohrpunkten, die außerhalb des Einbruchbereiches liegen. Sie erfolgt durch Ansteuerung des jeweils langsamsten Antriebes einer Bewegungsebene über das Bedienpult und die anderen Antriebe werden entsprechend der Parallelitätsbedingung geregelt nachgeführt.

Obwohl die eingesetzte Steuerelektronik die Abbohrung eines gesamten, beliebigen Bohrschemas gestattet, wird davon ausgegangen, daß im Automatikbetrieb nur die Löcher im Einbruchbereich abgebohrt werden. Da dies der mittlere Teil eines Bohrschemas ist, kann auf die aufwendige Sensorik zur Erfassung des Streckenprofiles verzichtet werden. Die

Erfassung und Abspeicherung der Bezugsstellung (Großlochposition und -richtung) ist für diese Betriebsart ausreichend.

11. Zur Weiterentwicklung der Bohrwagen SB 2/1 und SB 2/2 werden folgende Entwicklungsetappen vorgeschlagen:

- Konstruktive Überarbeitung des Bohrwagens im Mechanik- und Hydraulikbereich zum Einsatz der Proportionalstromregelventile mit dem Ziel der Verbesserung der Handsteuerung. Die Konstruktion muß die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit, den Sensoreinsatz und die spätere automatische Antriebsansteuerung erfüllen.

Diese Entwicklungsstufe dient der Gewöhnung der Bohrwagenfahrer an die veränderte Bedienung und zur Umstellung der Serviceabteilungen auf die neue Technik.

- Realisierung der Handpositionierung mit geregelter Lafettenparallelführung durch Sensor- und Bordrechnereinsatz.

Zur Vorbereitung der nächsten Etappe sind weiterführende Untersuchungen zur Regelkreis- und Hardwaregestaltung mit dem vorhandenen Aufbau durchzuführen. Darüberhinaus könnten mit der Erfassung betriebstechnischer Daten (Standzeiten, Reparaturzyklen,) weitere Informationen zur weiteren Entwicklung gewonnen werden.

- Einführung des automatischen Abbohrens des Einbruches

Die zusätzlichen Konstruktionen, Hard- und Softwareteile gegenüber der zweiten Entwicklungsstufe hängen von den Ergebnissen des praktischen Einsatzes ab.

12. Für die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse sind noch offene Probleme der Auswirkungen von Verschleiß und Lafettenandruck an die Ortsbrust auf die Positionierung sowie der Vorgabe eines Bohrschemas als konkrete Anordnung der Bohrlöcher für den Automatikbetrieb in Abhängigkeit vom Abschlagprofil zu untersuchen.